



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY**

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**SYSTEM ON-/OFFLINE MERANIA TEPLoty NA BÁZE  
LABVIEW**

SYSTEM OF ON-/OFFLINE TEMPERATURE MEASUREMENT BASED ON LAB VIEW

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. David Stejskal**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Dr. Ing. Daniel Prostředník, CSc.**

**BRNO 2019**



# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky  
Student: **Bc. David Stejskal**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Kvalita, spolehlivost a bezpečnost  
Vedoucí práce: **doc. Dr. Ing. Daniel Prostředník, CSc.**  
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## System On-/Offline merania teploty na báze LabView

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Študent má za úlohu vytvoriť meracie pracovisko na báze PC pre cvičenia predmetu meracia technika ktoré:

- umožní meranie teploty v rozsahu 0 °C až 100 °C
- bude použitý snímač typu Pt (doplnený meracím zesilovačem)
- meraný signál bude digitalizovaný minimálne 12 bitovým prevodníkom
- dosiahnutá vzorkovacia frekvencia bude minimálne 1 Hz
- systém musí umožňovať číslicové filtrovanie meraného signálu a ukladanie meraných dát vo formáte excel
- systém bude s podporu LabView.

Práci musí predchádzať teoretická príprava v ktorej budú rozobrané základy signálovej analýzy. Práca musí obsahovať zdôvodnenie konkrétneho riešenia.

Súčasťou práce musí byť návrh overenia správnosti funkcie meracieho zariadenia a jeho realizácia. O overení musí byť vypracovaný protokol.

**Cíle diplomové práce:**

Rešerše spracovania analogových signálov pomocou personálneho počítača na báze systému LabView.

Návrh meracieho pracoviska pre meranie teploty v rámci cvičení predmetu meracia technika.

Realizácia pracoviska a jeho programového vybavenia.

Overenie presnosti meracieho pracoviska.

**Seznam doporučené literatury:**

BERNSTEIN, Herbert. PC- Meßlabor. 1. Germany: Franzis Verlag, 1998. ISBN 3772357334.

PROFOS, Paul a Tilo PFEIFER. Handbuch der industriellen Messtechnik. 6. München: R. Oldenbourg Verlag GmbH, München, 1994. ISBN 3-486-22592-8.

National Instruments: Testovací, měřicí a integrované systémy - National Instruments [online], 2018. Austin, Texas: Agent c/o Legal Department National Instruments [cit. 2018-11-12]. Dostupné z: <http://www.ni.com/cs-cz.html>

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Cílem této práce bylo vytvořit program na bázi LabVIEW pro měření teploty pomocí osobního počítače. Program umožňuje čtení a úpravu digitálního signálu z měřicího řetězce, který je tvořen senzorem typu PT100, měřicím zesilovačem a analogově digitálním převodníkem s USB výstupem.

Teoretická část práce se věnuje především odporovým snímačům teploty, signálové analýze a zmiňuje metody pro zpracování signálu. Praktická část je pojata jako příručka k vytvořenému programu. Tato část představuje dílčí prvky programu a popisuje jejich princip, praktické využití a v neposlední řadě i návod k obsluze. Dle zadání byl vypracován také protokol o ověření měřicího zařízení, které proběhlo v laboratoři Českého metrologického institutu v Brně.

## **ABSTRACT**

The objective of this thesis was to create a LabVIEW-based program for temperature measurement using a personal computer. The program allows reading and post processing of digital signal from a measuring device. This device consists of a sensor type PT100, a measuring transducer and an analog-to-digital converter with USB output.

The theoretical part of the thesis deals with resistance temperature sensors, signal analysis and methods for signal processing. The practical part is conceived as a guide to the created program. This part introduces vital sub-elements of the program and describes their principle, practical use and also the operating instructions. As required by thesis assignment, practical part includes verification of the measuring device, which was performed in laboratory of Czech Metrology Institute in Brno

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Měření teploty, LabVIEW, odporový snímač teploty, PT100, signálová analýza, zpracování signálu, počítačový program, kalibrace, nejistota měření

## **KEYWORDS**

Temperature measurement, LabVIEW, resistance temperature detector, PT100, signal analysis, signal processing, computer program, calibration, measurement uncertainty


## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

STEJSKAL, David. *Systém On-/Offline měření teploty na bázi LabView*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116926>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Daniel Prostrečník.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma „**Systém On-/Offline měření teploty na bázi LabView**“ vypracoval samostatně pod vedením pana doc. Dr. Ing. Daniela Prostředníka, CSc. a s použitím literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou uvedeny v seznamu na konci práce.

V Brně dne 18. května 2019

  
.....  
David Stejskal

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji panu doc. Dr. Ing. Danielu Prostředníkovi CSc. za odborné vedení a cenné rady při zpracování diplomové práce. Děkuji také panu Ing. Jiřímu Bílkovi a pracovníkům Českého metrologického institutu v Brně za to, že mi umožnili ověřit přesnost měřicího zařízení a za jejich ochotu a pomoc při měření.

Rád bych také poděkoval svým rodičům a sourozencům za vytrvalou podporu během studia.



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
1.1	Rozbor zadání a stanovení cílů .....	11
<b>2</b>	<b>TEPLOTA .....</b>	<b>12</b>
2.1	Významné body při určování teploty .....	12
2.2	Jednotka teploty .....	13
<b>3</b>	<b>MĚŘENÍ TEPLoty .....</b>	<b>15</b>
3.1	Teploměry .....	15
3.2	Oporové snímače teploty .....	17
3.2.1	Platinový senzor PT100 .....	19
3.2.2	Určení R-T závislosti PT odporového snímače .....	20
3.2.3	Komplikace při měření odporovými snímači .....	22
3.2.4	Metody zapojení PRTD .....	23
<b>4</b>	<b>ZÁKLADY SIGNÁLOVÉ ANALÝZY .....</b>	<b>25</b>
4.1	Teorie signálu .....	25
4.2	Zpracování signálu .....	26
4.2.1	Digitalizace analogového signálu .....	27
4.2.2	Zesílení signálu .....	29
4.2.3	Linearizace signálu .....	31
4.2.4	Filtrace signálu .....	32
4.2.5	Další metody zpracování signálu .....	34
4.2.6	Analýza dat .....	35
<b>5</b>	<b>NÁVRH A REALIZACE MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ .....</b>	<b>38</b>
5.1	Systém sběru dat .....	38
5.1.1	Senzor .....	39
5.1.2	Měřicí zesilovač .....	40
5.1.3	DAQ zařízení .....	41
5.1.4	Počítač .....	42
5.2	Zapojení měřicího obvodu .....	42
5.3	Určení významných parametrů .....	43
<b>6</b>	<b>NÁVRH A REALIZACE PROGRAMU .....</b>	<b>44</b>
6.1	LabVIEW .....	44
6.1.1	Programovací prostředí LabVIEW .....	44
6.2	Elementární prvky vytvořeného programu .....	45
6.2.1	Virtuální generátor napětového signálu .....	45
6.2.2	Získávání dat pomocí DAQ karty USB-6008 .....	46

6.2.3	Převod měřeného signálu na teplotu.....	47
6.2.4	Převodník jednotek teploty .....	48
6.2.5	Klouzavý průměr .....	48
6.2.6	Určení minima a maxima měřených teplot.....	49
6.2.7	Ukládání dat ve formátu .xlsx (Excel).....	49
6.2.8	Grafické a numerické výstupy .....	51
6.2.9	Číslicové filtry .....	52
6.2.10	Funkce rychlé kalibrace hodnot.....	54
6.2.11	Nástroje pro analýzu dat .....	56
6.3	Celkový přehled programu.....	58
<b>7</b>	<b>OVĚŘENÍ SPRÁVNOSTI FUNKCE MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ.....</b>	<b>60</b>
7.1	Instrumentální chyby použitého měřicího zařízení .....	61
7.2	Metody ověření a kalibrace RTD .....	63
7.2.1	Postup kalibrace pro měřicí řetězec s PT100.....	64
7.3	Nejistota kalibračního měření .....	65
7.3.1	Zdroje nejistot při ověřování RTD .....	65
7.4	Návrh a realizace ověření měřicího zařízení.....	66
7.4.1	Naměřená data z kalibrace.....	69
7.4.2	Určení nejistoty měření .....	69
7.5	Vyhodnocení naměřených dat.....	73
7.5.1	Adjustace vytvořeného programu.....	73
<b>8</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>75</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>76</b>
9.1	Seznam zdrojů použitých obrázků .....	79
<b>10</b>	<b>SEZNAM POUŽÍVANÝCH ZKRATEK A VELIČIN .....</b>	<b>80</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK .....</b>	<b>81</b>
<b>12</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>83</b>
	PŘÍLOHA A.....	84
	PŘÍLOHA B .....	85
	PŘÍLOHA C .....	88

# 1 ÚVOD

Asi každý má představu o tom, co se skrývá pod pojmem teplota. Toto slovo ostatně slyšíme a používáme každý den. Navzdory tomu se teplota obtížně vysvětluje, a ještě hůře definuje. K pochopení podstaty teploty je totiž nutné opustit makroskopický náhled na svět a zkoumat tento „všední“ fyzikální jev na úrovni elementárních částic.

Poznání podstaty každého fyzikálního jevu je nutné k tomu, abychom pochopili a dovedli předvídat jeho následky. Ačkoliv tedy pocity chladu a tepla zažívali lidé již od pradávna, měření teploty si osvojili až s rozvojem technologií v průběhu novověku. Ještě v 17. století bylo ostatně měření teploty převážně subjektivní záležitostí. A to i přesto, že se problematikou teploty a jejího měření údajně zabývaly i starověké civilizace. Až moderní technologie, nové souvislosti a poznatky o chování částic však byly klíčem k rozluštění tak běžného (a přesto tak záhadného) jevu, jakým teplota byla.

V dnešní době má určování teploty významnou roli v mnoha oblastech lidské činnosti. Měření teploty nachází uplatnění v průmyslu, ve zdravotnictví, je základem bezpečnosti v dopravě, základem spolehlivosti v energetickém průmyslu a po celá staletí určuje kvalitu odlitků v metalurgii [1]. Bez nadsázky můžeme říct, že teplota je jednou z nejčastěji měřených fyzikálních veličin a schopnost přesného měření a regulace teploty otevřela lidstvu zcela nové obzory.

## 1.1 Rozbor zadání a stanovení cílů

Cílem diplomové práce je vytvořit virtuální měřicí pracoviště pro měření teplot v rozsahu 0 až 100 °C s využitím personálního počítače. Dle zadání bude použit platinový odporový snímač teploty, měřicí zesilovač a vhodný A/D převodník. Požadavkem je dosáhnout vzorkovací frekvence alespoň 1 Hz. Pro komunikaci s měřicím řetězcem má být vytvořen počítačový program na bázi LabVIEW. Program bude přijímat digitalizovaný signál z převodníku a bude jej dále zpracovávat tak, aby zobrazoval hodnotu snímané teploty a dalších vybraných parametrů. Dle zadání musí program umožnit ukládání naměřených dat ve formátu Excel a číslicové filtrování signálu.

Diplomová práce je rozdělena a seřazena do 8 kapitol. Kapitoly 2 až 4 se zabývají teoretickou přípravou, která je pro realizaci úkolu nezbytná. Teoretická část začíná pojednáním o teplotě jako o fyzikální veličině a krátce se věnuje také metodám měření teploty. Důkladně je rozebrána problematika odporových teplotních senzorů a základy signálové analýzy. Praktická část diplomové práce (tj. realizace zadaného úkolu) je popsána v kapitole páté (měřicí sestava) a šesté (seznámení s LabVIEW, vytvoření programu). Sedmá kapitola se věnuje ověření funkčních vlastností měřicího systému. Součástí je také ověření přesnosti, vyhodnocení výsledků měření a návrhy pro dosažení vyšší přesnosti. Stručné shrnutí celé diplomové práce je popsáno v závěrečné kapitole.

## 2 TEPLOTA

Teplota je skalární fyzikální veličina popisující tepelný stav hmoty. Jedná se o jednu ze sedmi základních jednotek SI soustavy, která je součástí mnoha fyzikálních zákonů a klíčovou vlastností pro popis tepelných jevů.

Základní veličinou pro kvantitativní popis teploty je termodynamická teplota, která se označuje symbolem  $T$ . Termodynamická teplota patří mezi stavové veličiny, které popisují stav termodynamických systémů. Její jednotkou je kelvin [K] a konkrétní hodnota se určuje pomocí termodynamické teplotní stupnice. Základním referenčním bodem této stupnice je trojný bod vody ( $273,16\text{ K} = 0,01\text{ °C}$ ), což je teplota, při které se může voda vyskytovat ve všech třech skupenstvích současně. Právě pomocí teploty trojného bodu je kelvin definován v mezinárodní soustavě jednotek SI. [2]

Měření na základě referenční teploty je poměrně komplikované. Pro praktické měření se proto zavedla mezinárodní teplotní stupnice ITS-90 (aktualizovaná verze z roku 1990) s pevně definovanými body. Tyto body odpovídají rovnovážným stavům mezi fázemi určitých látek a jsou relativně snadno realizovatelné. [3]

Abychom pochopili skutečný význam teploty, je potřeba opustit makroskopický náhled na svět. Tepelný stav látky totiž úzce souvisí s pohybem elementárních částic látky, konkrétně s jejich kinetickou energií. Mezi teplotou a průměrnou kinetickou energií částic existuje přímá úměra, a proto se teplota často popisuje jako rychlost neuspořádaného pohybu částic. U pevného skupenství se neuspořádaným pohybem rozumí kmitání částic kolem rovnovážné polohy. U kapalného se pohybují i samotné rovnovážné polohy a u plynů je pohyb částic neuspořádaný v celém objemu. [2]

Čím rychlejší je neuspořádaný pohyb částic, tím vyšší je teplota tělesa. Stanovit teplotu (respektive rychlost kmitání) pro elementární částici je ale nemožné, protože nelze jednoznačně odlišit rychlosti uspořádaného pohybu (např. proudění vzduchu) a kmitání. Teplotu lze proto určit jen pro větší celky, kde je dána průměrnou rychlostí chaotického pohybu částic. [2]

Termodynamické systémy mají snahu přecházet do rovnovážných stavů, ve kterých je teplota všech těles systému stejná. Toto chování je výsledkem tepelného záření, které látky vyzařují a současně pohlcují. Všechny molekuly jsou totiž tvořeny elektricky nabitými částicemi, při jejichž pohybu dochází ke vzniku proměnlivého magnetického pole. Nestacionární magnetické pole je příčinou vzniku indukovaného elektrického pole, a každá kmitající částice je tudíž zdrojem elektromagnetického vlnění – tepelného záření, jehož frekvence se zvyšuje s teplotou tělesa. Látky s vyšší teplotou tedy předávají energii látkám s nižší teplotou, čímž se jejich teploty navzájem vyrovnávají. [2]

### 2.1 Významné body při určování teploty

Pro usnadnění popisu teplotních stupnic a pro jednoznačné definice se vychází obvykle ze tří významných teplotních bodů. První dva body souvisí se změnami skupenství vody při

normálním atmosférickém tlaku. Konkrétně se jedná o teplotu tuhnutí a teplotu vypařování. Třetí významný bod slouží k popisu minimální dosažitelné teploty.

Z výše uvedeného vyplývá, že látka dosáhne nejnižší možné teploty ve chvíli, kdy se zastaví veškerý tepelný pohyb částic. Tento stav látky se označuje jako absolutní nula. Absolutní nuly ovšem podle třetího termodynamického zákona nelze dosáhnout, lze se ji pouze limitně přiblížit, a proto se jedná o stav hypotetický [2]. Současné poznatky navíc ukazují, že specifické termodynamické systémy mohou dosahovat i záporné termodynamické teploty, tedy teploty nižší než absolutní nula. Není bez zajímavosti, že tyto systémy předávají „záporné“ teplo systémům s vyšší teplotou. Z fyzikálního hlediska se tedy chovají, jako by byly teplejší než systémy s nekonečnou teplotou, a tudíž ani neporušují termodynamické zákony. [4]

## 2.2 Jednotka teploty

Teplota má, podobně jako třeba délka nebo hmotnost, několik různých jednotek, které umožňují teplotu kvantitativně vyjádřit. Každá jednotka má vlastní teplotní stupnici a tyto stupnice se mohou lišit rozsahem i velikostí stupně. Vědecké publikace nejčastěji operují s již zmiňovanou jednotkou kelvin [K], která je zároveň základní jednotkou teploty v SI soustavě [3]. Pro běžné určování teploty se ale Kelvinova stupnice příliš nepoužívá.

Nejznámější a nejpoužívanější teplotní stupnicí je Celsiova stupnice, kterou v roce 1742 sestavil švédský astronom Anders Celsius. Stupnici definují dva významné body: teplota tání a teplota varu vody. Původně byly ovšem hodnoty těchto dvou bodů obrácené (bod varu 0 °C, bod tání 100 °C). [5]

**Tab. 2.1)** Teplotní stupnice a převodní vztahy na Kelvinovu stupnici [6]

Stupnice	Jednotka	Významné body stupnice <sup>1</sup>			Převodní vztah
		abs. nula	var H <sub>2</sub> O	tuhnutí H <sub>2</sub> O	
Kelvinova	[K]	0 K	273,15 K	373,15 K	-
Celsiova	[°C]	- 273,15 °C	0 °C	100 °C	$T_C = T_K - 273,15$
Fahrenheitova	[°F]	-459,67 °F	32 °F	212 °F	$T_F = \frac{9T_K}{5} - 459,67$
Rankinova	[°R]	0 °R	491,67 °R	671,67 °R	$T_R = \frac{9T_K}{5}$
Réamurova	[°Ré]	-218,52 °Re	0 °Re	80 °Re	$T_{Re} = 0,8T_K - 218,52$
Newtonova	[°N]	-90,14 °N	0 °N	33 °N	$T_N = \frac{33 * (T_K - 273,15)}{100}$

<sup>1</sup>předpoklad normálního atmosférického tlaku 101 325 Pa

Kelvinova stupnice vznikla odvezením z Celsiovy stupnice s praktickým záměrem odstranit záporné hodnoty z fyzikálních výpočtů. Proto Kelvinova stupnice začíná absolutní nulou a velikost 1 stupně je ekvivalentní s Celsiovou stupnicí. Celsiova stupnice se používá celosvětově, avšak ve Spojených státech amerických a na několika přilehlých ostrovech se pro určování teploty preferuje stupnice Fahrenheitova. V USA se okrajově používá také Rankinova stupnice, která je modifikací Fahrenheitovi stupnice.

Dnes téměř nepoužívanou teplotní stupnicí je Newtonova stupnice nebo Réamurova stupnice, která nachází uplatnění prakticky jen v některých potravinářských firmách s tradiční výrobou [5].

## 3 MĚŘENÍ TEPLOTY

Abychom určili teplotu látky či tělesa, musíme provést měření teploty. Všechny metody měření teplot jsou metody nepřímé, protože změřit přímo teplotu jako fyzikální veličinu není možné. Využívá se proto jiných fyzikálních veličin se známou závislostí na teplotě. V praxi se například pozoruje změna elektrických vlastností, délková nebo objemová roztažnost či tok vyzařované energie.

Dle typu měřicích zařízení rozlišujeme kontaktní a bezkontaktní měření teplot [3]. Kontaktní měřidla využívají přenosu tepla mezi objekty, a proto je měřidla nutné uvést do fyzického kontaktu s měřeným objektem či látkou. Nevýhodou je, že teplota měřeného média či objektu musí nejprve přejít do rovnovážného stavu s teplotou měřicího zařízení. Kontaktní nebo též dotykové měření je více rozšířené a uplatňuje se u snadno přístupných objektů. Podmínkou pro použití ovšem je, aby senzor chemicky nebo jinak nereagoval s měřeným objektem. [3]

Bezkontaktní měření teploty je založeno na analýze tepelného záření. Podle teploty objektu se totiž mění frekvence vyzařovaného elektromagnetického vlnění. Bezkontaktní senzory snímají infračervené záření, což je část spektra elektromagnetického záření o vlnové délce od 760 nm do 1 mm. [7]

### 3.1 Teploměry

Zařízení určené k měření teploty se nazývá teploměr. Existují desítky různých teploměrů, které se liší konstrukcí, principem i určením, avšak nejrozšířenějším typem teploměru jsou dilatační kapalinové teploměry. Principy běžně používaných teploměrů jsou stručně nastíněny v následující části.

#### Dilatační teploměry

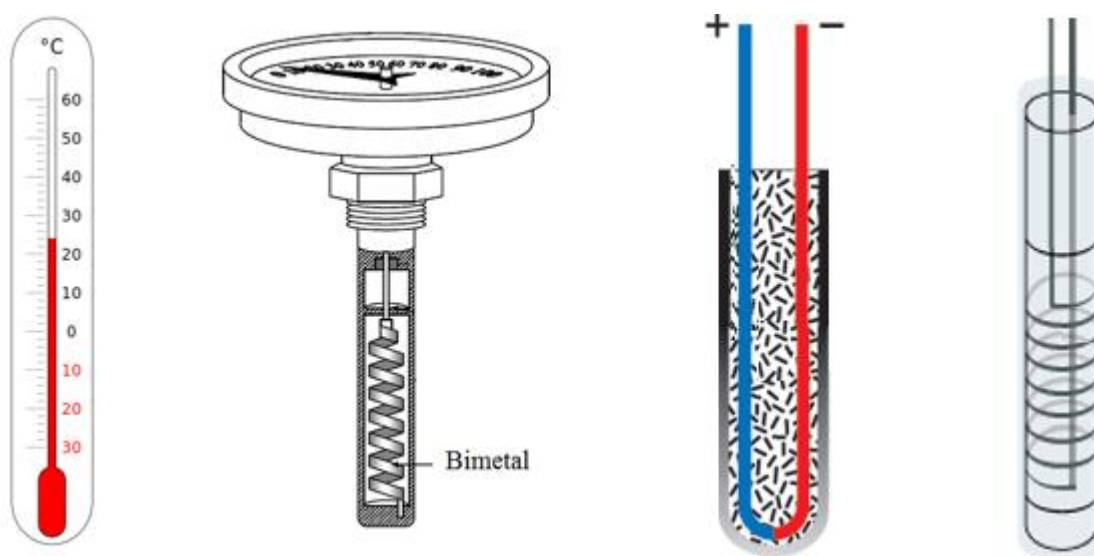
Dilatační teploměry jsou kontaktní mechanické teploměry, které využívají objemové či délkové teplotní roztažnosti látek. Například výše zmíněný kapalinový teploměr měří teplotu pomocí rozpínající se kapaliny v kapiláře. Princip kapalinových teploměrů je patrný ze stavové rovnice, podle které se objem kapaliny zvětšuje s rostoucí teplotou (za předpokladu konstantního tlaku). Jako teploměrná kapalina se běžně používala rtuť, avšak ta byla kvůli svým toxickým vlastnostem v Evropské unii zakázána. Typickým příkladem dilatačního teploměru je pokojový nebo lékařský teploměr. [3]

Dalším typem dilatačního teploměru je bimetalový teploměr. Tento teploměr využívá k měření bimetalovou spirálu vyrobenou ze dvou kovů s odlišnou tepelnou roztažností. Při změně teploty se spirála ohýbá a vychyluje ručičku přístroje (obr. 1). Princip bimetalu nevyužívají pouze teploměry, ale také například elektrické jističe, termostaty či tepelné pojistky (využití bimetalových pásků). [7]

## Elektrické teploměry

Elektrické teploměry využívají fyzikálních jevů, u kterých teplota ovlivňuje elektrické veličiny. Jedná se o kontaktní teploměry analogové, jejichž elektrický signál se obvykle digitalizuje. Typickými zástupci této kategorie jsou termočlánky nebo odporové teploměry. Termočlánek funguje na principu termoelektrického jevu. Teploměr tvoří dva kovové dráty, které jsou na jednom konci spojené (obr. 3.1). Pokud není měřená teplota (tj. teplota spoje) stejná, jako teplota celého teploměru, pak můžeme na druhém konci naměřit termoelektrické napětí, které je funkcí rozdílů teplot na obou koncích drátů. [3]

Odporové teploměry využívají toho, že elektrický odpor kovových nebo polovodičových vodičů vzrůstá s teplotou. Teplota se tedy určuje na základě změny odporu vodiče [8]. Problematika kovových odporových snímačů teplot je podrobně rozebrána v podkapitole 3.2.



**Obr. 3.1** Teploměry (zleva): kapalinový dilatační; bimetalový; termočlánek a odporový teploměr. (převzato z: [43]; upraveno)

## Optické (bezkontaktní) teploměry

Optické teploměry slouží k bezkontaktnímu snímání teplot. Teploměry snímají určitou část spektra infračerveného záření, které objekty vyzařují. Infračervené záření není pro lidské oko viditelné, a proto se zaznamenané hodnoty převádí do podoby číslic (pyrometry) nebo se vizualizují do charakteristicky zbarveného snímku (termokamery).

Výhodou je, že bezkontaktní teploměry lze použít i pro měření vysokých teplot nebo pro měření rychlých teplotních změn. I proto nachází uplatnění především v průmyslu [7].



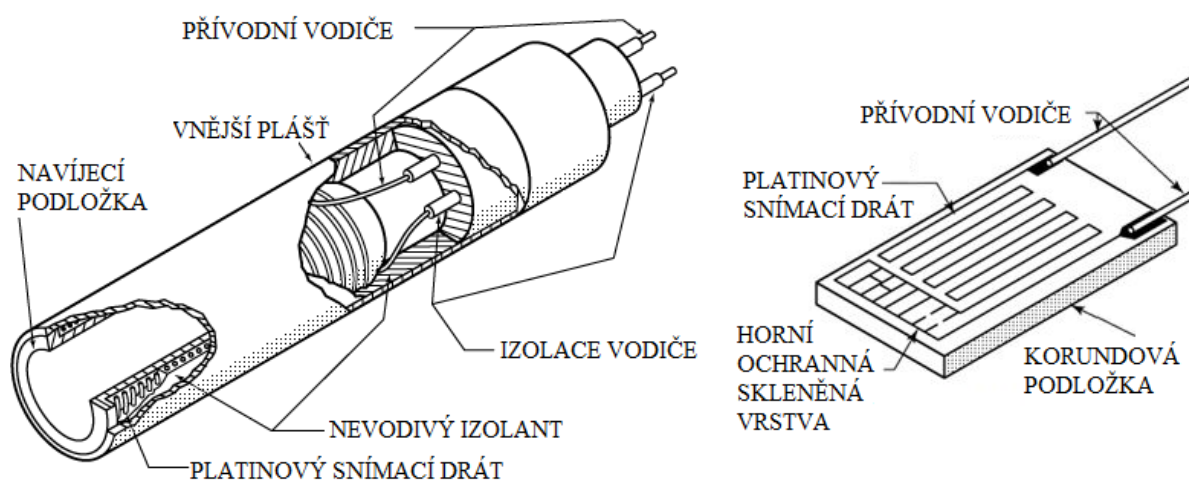
### 3.2 Odporové snímače teploty

Podle zadání této diplomové práce má být k sestavení měřicího pracoviště použit platinový odporový snímač. Následující kapitola se proto podrobně věnuje problematice kovových odporových snímačů.

Odporový snímač teploty je jednoduché zařízení, které se používá pro snímání teplot v rozsahu  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $+800\text{ }^{\circ}\text{C}$  [9]. Snímače se často označují zkratkou RTD, která pochází z anglického výrazu Resistance Temperature Detector (odporový snímač teploty). K určení teploty se u odporových snímačů využívá jedna z typických vlastností kovů, kterou je závislost měrného odporu na teplotě. Tato závislost je nelineární a pro každý materiál individuální. [8]

Hlavním prvkem RTD je kovový drátek, obvykle z čisté platiny, mědi nebo čistého niklu. Podle konstrukce rozlišujeme odporové snímače vinuté nebo plošné (obr. 3.2). U vinutých snímačů je drátek navinutý na speciální podložce a je zatavený do keramického nebo skleněného tělíska. U plošných snímačů je platinový meandr umístěn na ploché korundové destičce a je překryt skleněnou ochrannou vrstvou. [7]

Kromě kovových odporových snímačů se používají také polovodičové odporové snímače. Ty, byť se liší konstrukcí, fungují na velmi podobném principu, protože využívají závislost odporu polovodiče na teplotě. U polovodičových odporových snímačů může odpor s rostoucí teplotou růst (PTC termistor – pozistor) nebo klesat (NTC termistor – negastor). Ve srovnání s kovovými snímači jsou polovodičové snímače citlivější a mají příznivější dynamické vlastnosti. Jejich R-T závislost se ovšem od ideálního lineárního průběhu výrazně liší [7] [10].

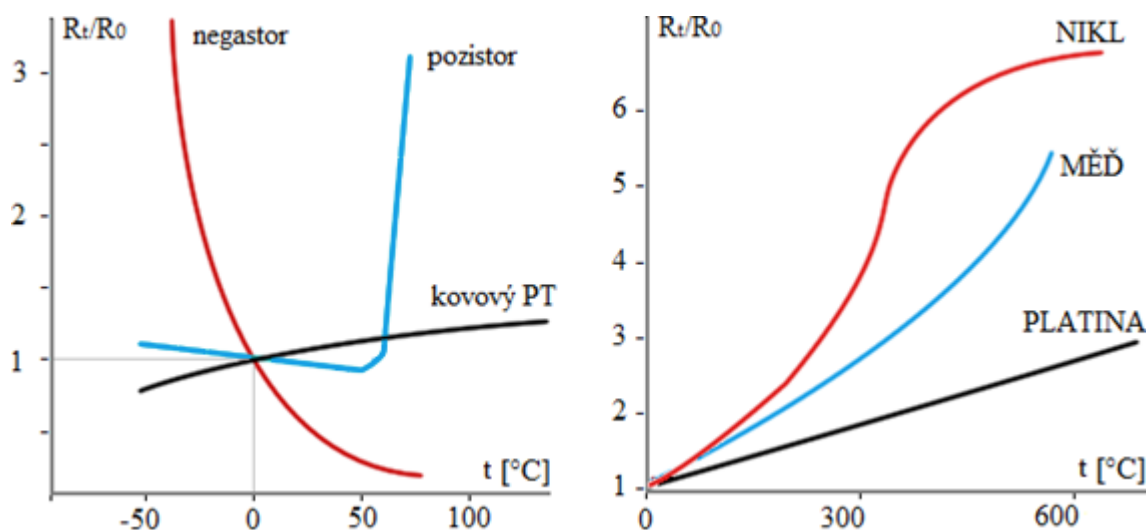


**Obr. 3.2)** Platinové RTD: vinutý snímač (vlevo) a plošný snímač (vpravo); (převzato z [42]; upraveno)

Nejvíce rozšířené odporové snímače jsou snímače s platinovým elementem. Platina se před ostatními materiály upřednostňuje především z toho důvodu, že její závislost odporu na teplotě má nejbližší k lineárnímu průběhu [1]. Platina navíc disponuje vhodnými fyzikálními a chemickými vlastnostmi, takže platinové RTD dosahují vysoké přesnosti v širokém rozsahu měřených teplot. Některé platinové snímače dosahují přesnosti až  $0.01 \Omega$  (rozlišitelnost přibližně  $0.026 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) při teplotě  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Zároveň se jedná o velmi stabilní snímače, jelikož chyba vlivem stárnutí PT měřidel nepřesahuje  $0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$  za rok (některé modely dokonce  $0.0025 \text{ } ^\circ\text{C}$ ). [8]

Jaký vliv má teplota na chování částic bylo popsáno v kapitole 2. S tepelným pohybem částic ovšem úzce souvisí také elektrický odpor, což je fyzikální veličina popisující schopnost vodičů vést elektrický proud. U elektricky vodivých materiálů jsou elektrony svrchní (valenční) vrstvy vázány slabšími silami. S rostoucí teplotou (energií) těchto částic kmitají částice stále více a po dosažení určité kritické hodnoty se uvolní ze své vazby. Volné elektrony, které jsou nositeli elektrického náboje, se pak pohybují v prostoru mezi atomy. S rostoucí teplotou se ovšem zvyšuje i rozkmit celých atomů, což komplikuje pohyb volných elektronů mezi atomy. Z makroskopického se tento jev projeví jako zvýšení elektrického odporu. [11] Vzájemná závislost je matematicky vyjádřena v následující podkapitole (vzorec 3.1).

Z obrázku 3.3 je ale patrné, že u polovodičů s rostoucí teplotou odpor klesá. To je způsobeno tím, že polovodiče nemají při nízké teplotě dostatek volných elektronů, které by vedly proud. Zvyšováním teploty dochází k uvolňování dalších elektronů, což má pro výsledný odpor významnější vliv, než je rostoucí kmitání atomů. [11]



**Obr. 3.3** Závislost odporu na teplotě (R-T) pro kovové a polovodičové RTD (vlevo) a R-T závislost pro různé kovy používané u RTD (vpravo). (převzato z: [7]; upraveno)

### 3.2.1 Platinový senzor PT100

Nejpoužívanějším typem RTD v průmyslu je snímač PT100, což se platinový snímač s jmenovitou hodnotou odporu  $100\ \Omega$  při teplotě  $0\ ^\circ\text{C}$ . Obdobně se značí platinové snímače s jmenovitou hodnotou odporu  $500\ \Omega$  (PT500) nebo  $1000\ \Omega$  (PT1000) při teplotě  $0\ ^\circ\text{C}$ . Jmenovitá hodnota odporu závisí na délce platinového drátu. Pro většinu aplikací lze využít kterýkoliv z výše uvedených modelů, avšak vždy je potřeba brát v potaz charakteristiky zvoleného snímače. Výhody a nevýhody jednotlivých platinových snímačů jsou uvedeny v podkapitole 3.2.3. Existují i další typy platinových snímačů (s jmenovitou hodnotou odporu až  $10\ \text{k}\Omega$ ), nicméně jejich použití není příliš běžné. [8]

Snímače typu PT100 jsou univerzální snímače teploty a nachází tak široké uplatnění, například pro měření teploty proudění vzduchu či kapalin, měření povrchové teploty atd. V průmyslu se platinové senzory běžně ukládají do speciálních standardizovaných krytů (obr. 3.4), které odolávají korozi.

Jedním z limitů pro snímače PT100 je měření teplot vyšších  $660\ ^\circ\text{C}$ . Při vyšších teplotách začínají do platiny přecházet nečistoty z vnějšího kovového pláště teploměru, čímž se degradují požadované vlastnosti materiálu.

Nabídka snímačů PT100 je nejširší. Cenově se ale jednotlivé typy platinových RTD příliš neliší a cena nejlevnějších snímačů začíná kolem  $100\ \text{Kč}$ . S přesností senzoru a s teplotním rozsahem použitelnosti ovšem cena výrazně roste a běžně se pohybuje v řádu tisíců korun. PT100 se vyrábí jako vinuté i plošné snímače. Plošné snímače mají menší rozměry, takže se rychleji přizpůsobí okolní teplotě a jsou vhodnější, pokud potřebujeme rychlou odezvu. Vinuté snímače jsou naopak odolnější a díky větší tepelné kapacitě jsou méně náchylné na fluktuaci teploty.



**Obr. 3.4)** Různé typy platinových RTD. Zleva: RTD kabelový, RTD se strojním připojením, RTD s kovovou ochranou trubkou a RTD bez ochranné trubky (převzato z: [1]; upraveno)

### 3.2.2 Určení R-T závislosti PT odporového snímače

Při měření teploty se monitoruje napětí na RTD při známém průchozím proudu. Pomocí Ohmova zákona se dopočítá odpor snímače, který lze převést na teplotu. Závislost teploty na odporu u RTD snímačů ale není lineární. Vyjadřuje se proto graficky křivkou (obr. 3.4) nebo Callendar-Van Dusenovou rovnicí [8]:

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100)^3] \quad (3.1)$$

kde:  $R_t$  = odpor RTD při  $t$  °C [ $\Omega$ ]  
 $R_0$  = odpor RTD při 0 °C [ $\Omega$ ]  
 $A$  = lineární teplotní koeficient odporu [ $K^{-1}$ ]  
 $B$  = kvadratický teplotní koeficient odporu [ $K^{-2}$ ]  
 $C$  = mocninový teplotní koeficient 3.řádu [ $K^{-3}$ ]  
 $t$  = teplota RTD [°C]

Vztah je vyjádřen polynomem třetího řádu, avšak pro teploty od 0 °C do 650 °C je koeficient  $C$  roven 0, takže se celá rovnice zredukuje na kvadratickou rovnici (3.2) [12]. Při známém procházejícím proudu a měřeném napětí na výstupu lze ze zredukované Callendar-Van Dusenovy rovnice získat výslednou teplotu  $t$  °C (3.3) [8].

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2] \quad (3.2)$$

$$t = \frac{2(U_t - I_{EX}R_0)}{I_{EX}R_0 [A + \sqrt{A^2 + 4B(U_t - I_{EX}R_0)/I_{EX}R_0}]} \quad (3.3)$$

kde:  $U_t$  = napětí na RTD při teplotě  $t$  °C [V]  
 $I_{EX}$  = proud procházející RTD [A]

Vzájemná závislost odporu a teploty je charakterizována také teplotním koeficientem ( $\alpha$ ; [-]), který se ovšem pro rozdílné RTD liší. Konkrétní hodnotu udává výrobce, avšak obecně lze koeficient určit pomocí následujícího vztahu [8]:

$$\alpha = (R_{100} - R_0)/(R_0 * 100 [°C]) \quad (3.4)$$

kde:  $R_{100}$  = odpor RTD při 100 °C [ $\Omega$ ]  
 $R_0$  = odpor RTD při 0 °C [ $\Omega$ ]

U platinových odporových snímačů lze obvykle aplikovat některou ze standardizovaných R-T křivek: DIN 43760, U.S. Industrial nebo International Temperature Scale (běžně využívané u vinutých RTD). Z normy DIN 43760 vychází i technická norma IEC 60751, respektive ČSN EN 60751 stanovující R-T závislost pro průmyslové platinové snímače teploty. Na základě těchto standardů se stanovují i velikosti koeficientů Callendar-Van Dusenovy rovnice (A, B a C) a teplotní koeficient  $\alpha$ .

**Tab. 3.1)** Koeficienty pro jednotlivé standardy [8].

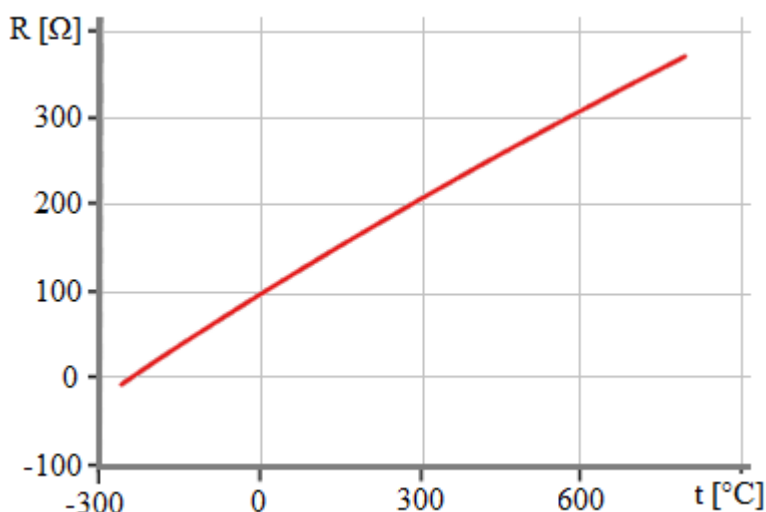
Standard	PRTD	$\alpha$	A [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]	B [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]	C <sup>1</sup> [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]
DIN 43760	PT100	0.003850	$3.9080 \times 10^{-3}$	$-5.8019 \times 10^{-7}$	$-4.2735 \times 10^{-12}$
U.S. Industrial	PT100	0.003911	$3.9692 \times 10^{-3}$	$-5.8495 \times 10^{-7}$	$-4.2325 \times 10^{-12}$
ITS-90	PT100	0.003926	$3.9848 \times 10^{-3}$	$-5.870 \times 10^{-7}$	$-4.0000 \times 10^{-12}$
ČSN EN 60751	PT1000	0.00385055	$3.9083 \times 10^{-3}$	$-5,775 \times 10^{-7}$	$-4.18350 \times 10^{-12}$

<sup>1</sup>pro teploty nižší než 0  $^{\circ}\text{C}$

**Tab. 3.2)** Třídy přesnosti pro snímače PT100 dle IEC 60751 [13].

Třída přesnosti	Tolerance [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Odpor při 0 $^{\circ}\text{C}$ [ $\Omega$ ]	Chyba při 100 $^{\circ}\text{C}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]
ASTM Grade B	$\pm (0.25 + 0.0042 \cdot  T )$	$100 \pm 0.1$	$\pm 0.67$
ASTM Grade A	$\pm (0.13 + 0.0017 \cdot  T )$	$100 \pm 0.05$	$\pm 0.3$
IEC Class C	$\pm (0.6 + 0.01 \cdot  T )$	$100 \pm 0.24$	$\pm 1.6$
IEC Class B	$\pm (0.3 + 0.005 \cdot  T )$	$100 \pm 0.12$	$\pm 0.8$
IEC Class A	$\pm (0.15 + 0.002 \cdot  T )$	$100 \pm 0.06$	$\pm 0.35$
IEC Class AA	$\pm (0.1 + 0.0017 \cdot  T )$	$100 \pm 0.04$	$\pm 0.27$
1/10 DIN <sup>2</sup>	$\pm (0.03 + 0.0005 \cdot  T )$	$100 \pm 0.012$	$\pm 0.08$

<sup>2</sup>není součástí IEC 60751, avšak běžně se používá



**Obr. 3.5)** Křivka závislosti odporu R na teplotě t pro snímač PT100; standard DIN 43760 ( $\alpha=0,00385$ ). Součinitel alfa říká, že při teplotě 100  $^{\circ}\text{C}$  bude odpor snímače 138,5  $\Omega$ . (převzato z: [8]; upraveno)

### 3.2.3 Komplikace při měření odporovými snímači

RTD je pasivní snímač. Zařízením tedy musí procházet elektrický proud z externího zdroje ( $I_{EX}$ ), abychom dosáhly měřitelného napětí [9]. Procházející proud ovšem může způsobit zahřátí senzoru (tzv. vlastní zahřívání), což se zákonitě projeví jako nežádoucí chyba měření. Vlastní zahřívání se definuje jako výkon, který zahřeje RTD o 1 °C. Důležitou roli zde hraje i okolní médium, protože například v proudící vodě je zahřívání méně výrazné než při měření ve vzduchu bez proudění. Abychom tuto chybu minimalizovali, musíme používat co nejmenší průchozí proud, který by neměl přesáhnout 1 mA (pro chybu menší než 0,1 °C) [8] [10].

Použitím snímače s vyšší jmenovitou hodnotou odporu lze měření provádět s nižším budícím proudem (např. pro PT1000 je standardem 0,3 mA). Tím se minimalizuje nežádoucí vlastní zahřívání, a navíc se sníží spotřeba energie. Vhodně zapojené PT100 ovšem umožňují přesnější měření [14].

Dalším problémem odporových snímačů teploty jsou relativně malé změny odporu při měření. Například změna teploty o 1 °C u snímače PT100 odpovídá změně odporu o necelých 0,4 Ω. Aby bylo možné zaznamenávat přesně i malé změny odporu snímače, je potřeba minimalizovat vliv odporu vodičů [8].

Vnitřní odpor vodičů může u zařízení, jakým je odporový snímač teploty, způsobit znatelnou chybu na výstupu. Odpor vodiče se vypočítá podle vztahů (3.5) a (3.6). Podle délky vodiče je proto nutné zvážit i kompenzaci odporu vodiče. Společnost National Instruments, výrobce programu LabVIEW, doporučuje kompenzaci u vodičů délky 3 m a více [8].

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha_R t) \quad (3.5)$$

$$R_{\text{vodiče}} = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad (3.6)$$

kde:  $R_{\text{vodiče}}$  = elektrický odpor vodiče [Ω]

$\rho$  = měrný elektrický odpor [ $\mu\Omega\text{m}$ ]

$l$  = délka vodiče [m]

$S$  = průřez vodiče [ $\text{mm}^2$ ]

$t$  = teplota vodiče [°C]

$\alpha_R$  = teplotní součinitel odporu [ $\text{K}^{-1}$ ]

$\rho_0$  = měrný elektrický odpor při teplotě 0 °C [ $\mu\Omega\text{m}$ ]

Z rovnice (3.5) je patrné, že kromě délky vodiče může změnu odporu vyvolat i změna průřezu  $S$  [10].

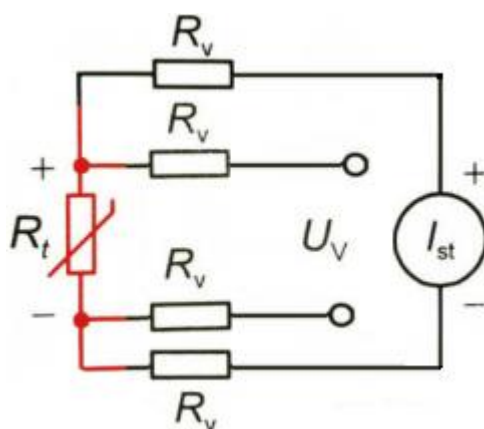
U snímačů typu PT100 je nutné počítat s větší náchylností na chyby vzniklé vlivem vnitřního odporu vodičů. Snímače PT1000 mají odpor desetkrát větší, takže malé změny způsobené odporem vodiče nemají na výsledek měření tak výrazný dopad. Vyšší jmenovitý odpor snímače PT1000 také umožňuje měřit s větším rozlišením (je možné zaznamenat i

menší teplotní změny). Snímače PT100 jsou naproti tomu vhodné pro měření větších teplotních rozsahů [14].

### 3.2.4 Metody zapojení PRTD

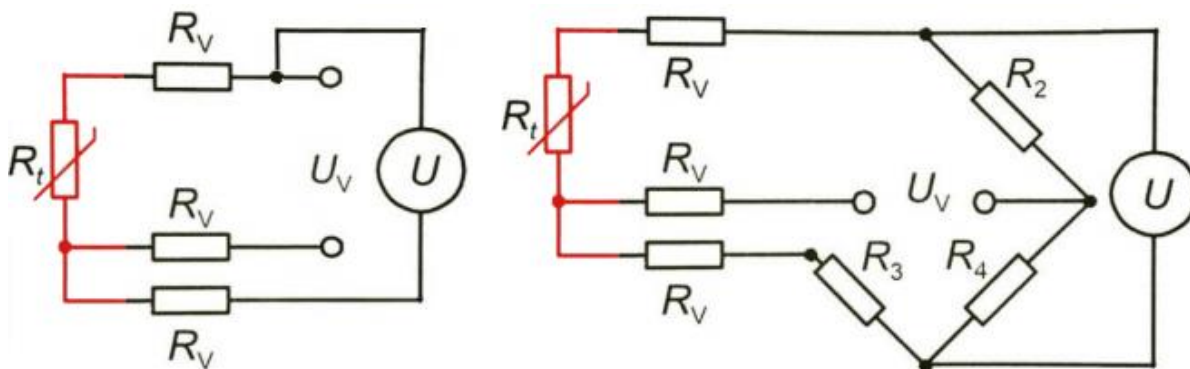
Problém s vnitřním odporem propojovacích vodičů lze efektivně řešit vhodným zapojením RTD do měřicího obvodu. Při zapojování platinových RTD se běžně využívají tři typy obvodů: dvou, tří a čtyřvodičové.

Preferovanou metodou pro zapojení RTD je čtyř-vodičové zapojení, kdy dva vodiče slouží k napájení snímače, zatímco další dva vodiče k odečítání napětí na snímači. Díky minimální hodnotě proudu ve vodičích odečítacího obvodu je vliv vnitřního odporu vodičů na odečítanou hodnotu zanedbatelný [1].



**Obr. 3.6)** Čtyřvodičové zapojení RTD (převzato z: [8]; upraveno)

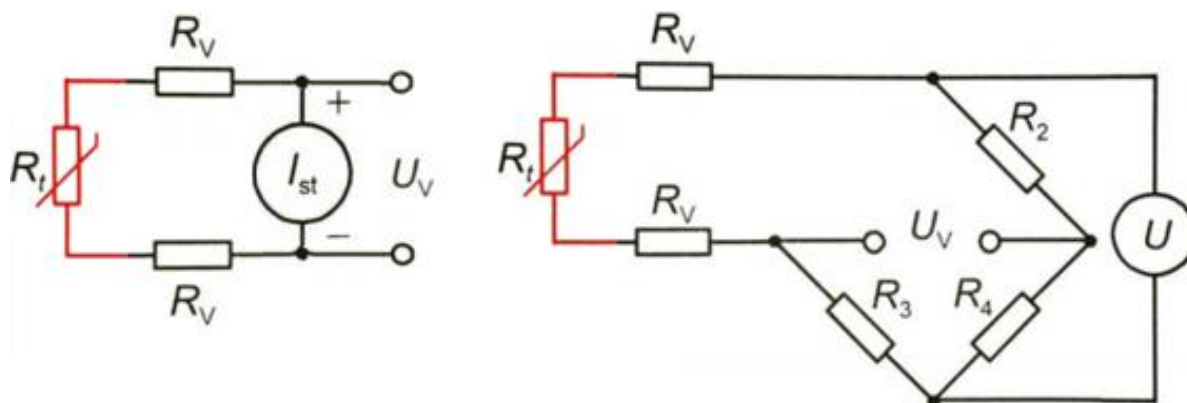
Méně nákladné a hojně využívané je zapojení třívodičové. První variantou je zapojení s využitím Wheatstonova můstku, kde se vlivy krajních vodičů navzájem eliminují, protože jsou na opačné straně můstku. Zbývajícím vodičem prochází malý proud, takže chyba je zanedbatelná. Alternativní možností je zapojení, kde je proud přiveden třetím vodičem a na odečítaném napětí se tedy projeví pouze jeden ze zbývajících vodič (poloviční chyba ve srovnání s jednoduchým dvouvodičovým zapojením) [8].



**Obr. 3.7)** Možnosti třívodičového zapojení. Jednodušší varianta (vlevo) je náchylnější na chybu způsobenou vnitřním odporem vodičů ( $R_v$ ) (převzato z: [1]; upraveno)



Nejjednodušší a nejlevnější variantou je dvou vodičové zapojení. Nevýhodou zapojení je větší vliv chyby způsobené vnitřním odporem vodičů ( $R_v$ ), které slouží jak pro přívod excitačního proudu, tak i pro měření napětí. Dvou vodičové zapojení lze použít, pokud není požadavek na vysokou přesnost a pokud přívodní vodiče nejsou dlouhé [13].



**Obr. 3.8)** Dvou vodičové zapojení RTD: jednoduché zapojení (vlevo) a měření odporů přes Wheatstoneův můstek (vpravo) (převzato z: [8] [1]; upraveno)

U snímačů PT100 se preferuje tří nebo čtyřvodičové zapojení, u kterých není vliv vnitřního odporu vodiče tak výrazný. U PT1000 se běžně používá i dvou vodičové zapojení, protože odpory vodičů jsou ve srovnání s jmenovitou hodnotou (1000 ohmů při 0 °C) méně významné než u PT100. Jak již bylo uvedeno, díky vyšší hodnotě odporu je možné u PT1000 použít také nižší proud, aby byly snímače méně náchylné na vlastní zahřívání [14]. Vlastní zahřívání snímače popisuje zatěžovací konstanta  $D$  [mW/K], kterou by měl výrobce uvádět s ostatními charakteristikami RTD [10]. Jako universální hodnota se uvádí 2.5 mW/K pro plošné RTD nebo 65 mW/K provinuté RTD [13].

Obvody bývají napájené zdrojem konstantního proudu nebo konstantního napětí (typické pro zapojení Wheatstoneovým můstkem). V obou případech je potřeba zajistit, aby proud procházející RTD nepřesahoval mezní hodnotu a nedocházelo tak k nežádoucímu vlastnímu zahřívání. Pro dosažení nejlepších výsledků (tzn. co nejlepší poměr signál-šum) je ovšem nutné použít co největší možný proud [13]. Maximální přípustný proud, při kterém chyba měření nepřesáhne stanovenou toleranci, se určí pomocí rovnice (3.7) [10].

$$I_{dov} = \sqrt{\frac{\Delta\vartheta_{max} D}{R}} \quad (3.7)$$

kde:  $I_{dov}$  = Maximální přípustný proud [mA]  
 $\Delta\vartheta_{max}$  = Maximální chyba měření [°C]; [K]  
 $D$  = zatěžovací konstanta [mW/K]  
 $R$  = Odpor RTD



## 4 ZÁKLADY SIGNÁLOVÉ ANALÝZY

Proces měření pomocí platinového RTD byl rozebrán v předchozích kapitolách. Pro sestavení měřicího pracoviště je ovšem zapotřebí naměřené hodnoty vhodně upravit a digitalizovat. Následující kapitola se zabývá zpracováním analogového signálu, jeho převedením do digitální podoby a následnými úpravami, které lze provádět programem LabVIEW.

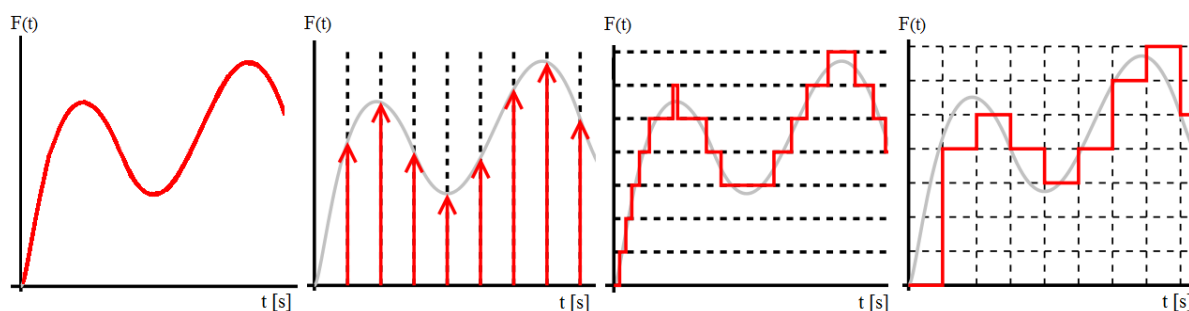
### 4.1 Teorie signálu

Signál se obecně definuje jako libovolná fyzikální veličina, která přenáší určitou zprávu. Matematicky se signál popisuje vzájemnou závislostí dvou parametrů. Jeden parametr se označuje jako závislá proměnná, druhý parametr jako nezávislá proměnná. Nezávislou proměnou bývá obvykle čas a závislou proměnou může být měřená veličina.

Podle charakteru signálu rozlišujeme spojité a diskrétní signály. Spojitý signál tvoří nekonečný počet navazujících bodů, takže jej můžeme zkoumat do libovolné hloubky. Pokud je signál spojitý v obou parametrech, pak se jedná o signál analogový [15].

Analogový signál je nositelem informací v reálném světě a může nabývat libovolných hodnot. Typickým příkladem je akustický signál (vibrace, zvukové vlny), elektrický signál (napětí, proud, elektrické a magnetické pole) nebo fyzikální signál (tlak, teplota a další) [16]. Analogové signály lze vyjádřit matematickou závislostí nebo graficky. Popsat reálný analogový signál je ale velmi obtížné, a proto se k popisu běžně používá aproximace nebo idealizované modely.

Opakem analogového signálu je digitální signál, který vzniká vzorkováním a kvantováním analogového signálu [17]. Vzorkování je proces, při kterém se v určitých časových intervalech zaznamenává hodnota signálu. Vzorkovaný signál tedy není spojitý v čase, ale jeho závislá proměnná může nabývat libovolných hodnot. Kvantování je naopak spojitě v čase, ale hodnota kvantovaného signálu může nabývat pouze určitých úrovní [17]. Hodnota se tedy mění skokově, avšak ke změně může dojít v libovolném čase. Z výše uvedeného vyplývá, že digitální signál je diskrétní v obou parametrech a na libovolném konečném intervalu je definovaný konečným počtem bodů. Tyto body mohou navíc nabývat jen určitých hodnot.



**Obr. 4.1)** Grafická interpretace signálu (zleva): analogový signál; vzorkovaný signál; kvantovaný signál a digitální signál (převzato z: [41]; upraveno)

Jinými slovy, okamžitá hodnota digitálního signálu se mění skokovými změnami a v pravidelných časových intervalech. Digitální signál se dnes běžně používá pro přenos informací, zvuku i obrazu (TV, PC, rádio, satelity).

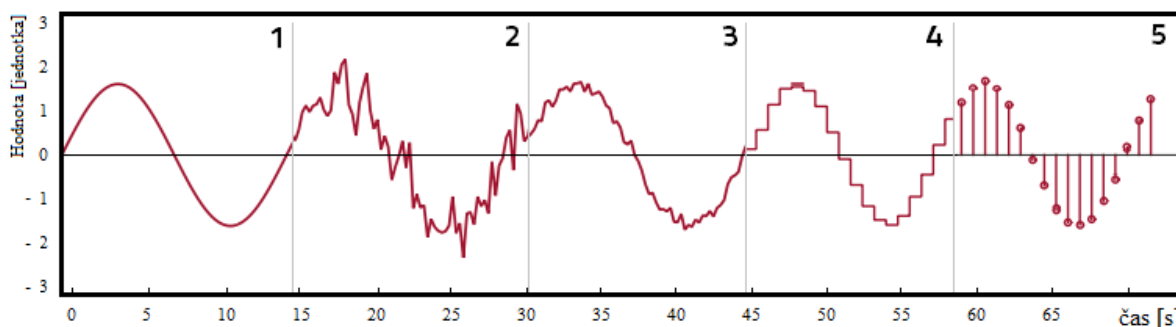
Množství informací, které signál přenáší, závisí obvykle na příjemci. Nejvíce informací přenáší signál, jehož obsah je pro příjemce neznámý. Konkrétní informaci pak ze signálu obdržíme sledováním určitých parametrů. Jeden signál tak může u různých příjemců vyvolat různé reakce. Ne každá informace je ovšem pro příjemce užitečná (nežádoucí signál se označuje jako šum) a proto se signály podrobují analýze za účelem extrahovat ze signálu námi požadovanou informaci [16].

## 4.2 Zpracování signálu

Jak analogové, tak i digitální signály se zpracovávají, aby se potlačil vliv šumu a aby bylo možné výstupní signál lépe identifikovat. Zpracování signálu zahrnuje úpravu signálu z měření, digitalizaci a následnou softwarovou analýzu [15]. Výstupem celého řetězce zpracování signálu je obvykle číselný údaj, popřípadě grafické znázornění signálu.

Pokud je signál zpracováván v analogové podobě, hovoříme o analogovém zpracování signálu. Opakem je číslicové zpracování signálu, kdy se signál upravuje až po digitalizaci.

Důležitou roli při zpracování periodického signálu hrají sinusoidy, které lze snadno generovat a které mají známé matematické vlastnosti. Pomocí Fourierovy řady (tj. součtem více sinusoid) lze vytvořit libovolný harmonický signál [18] [16]. Fourierovou transformací pak můžeme převést harmonické složky signálu z časové oblasti do oblasti frekvenční [17]. Tato metoda se běžně využívá například ve vibrodiagnostice a bude dále ještě rozebrána.



**Obr. 4.2)** Proces zpracování signálu: 1 - reálný signál měřené veličiny; 2 - zaznamenaný signál snímačem; 3 – úprava a zpracování signálu; 4 digitalizace signálu A/D převodníkem; 5 – diskrétní hodnoty, které vstupují do počítačového programu (převzato z: [44]; upraveno)

## Analogové a digitální zpracování signálu

Zpracování analogového signálu se provádí hardwarovými prvky (např. měřicí zesilovače) a má za úkol potlačit šum, zesílit či modifikovat měřené hodnoty nebo zabránit některým nežádoucím jevům. Tímto způsobem lze efektivně zlepšit poměr signálu a šumu. Naproti tomu digitální zpracování signálu se provádí softwarově, až po digitalizaci spojitého signálu, což přináší řadu výhod [16].

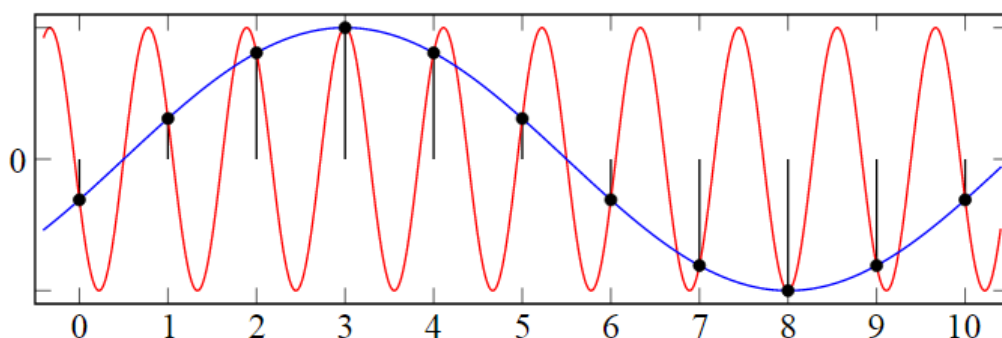
Hlavní výhodou digitálního zpracování je časová stálost a flexibilita systému. Vlastnosti jsou dány programem, který je v čase konstantní a jehož parametry lze podle potřeby měnit. Nemusí se tedy uvažovat stárnutí charakteristické pro fyzické součástky. Díky vysoké kapacitě paměti výpočetních zařízení je možné digitální zpracování signálu aplikovat i pro dlouhodobý časový horizont (např. zpracování signálu s časovými konstantami v řádu sekund, hodin, dní či měsíců) [17].

### 4.2.1 Digitalizace analogového signálu

Odporové snímače teploty zaznamenávají analogový signál. Takový signál sice můžeme analyzovat do libovolné hloubky, avšak pro zpracování číslicovou výpočetní technikou je analogový signál nevhodný [16]. Z toho důvodu se převádí na signál digitální, čehož se docílí využitím A/D převodníku. Na opačném principu (převod digitálního signálu na analogový) fungují D/A převodníky. Ty jsou ovšem pro zadaný úkol irelevantní, a proto se jimi nebudeme zabývat.

A/D převodníky fungují na výše nastíněném principu vzorkování a kvantování spojitého signálu [17]. Vzorkování se provádí z prostého důvodu: počítače disponují jen omezenou výpočetní kapacitou a mohou pracovat pouze s omezeným množstvím dat. Cílem vzorkování je tedy vybrat ze spojitého signálu nezbytné množství vzorků. Převodník vzorkování provede tak, že odebírá vždy jeden vzorek hodnoty signálu v pravidelných časových intervalech. Počet vzorků odebraných za jednotku času (obvykle 1 sekundu) je dán vzorkovací frekvencí [17]. Převrácená hodnota vzorkovací frekvence nám pak udává periodu času mezi odebráním dvou po sobě jdoucích vzorků.

V souvislosti se vzorkováním se často zmiňuje problematika aliasingu. Ta úzce souvisí se signály, které obsahují harmonickou složkou. Aliasing je důležitým tématem, pokud se pokoušíme restaurovat původní signál a provést frekvenční analýzu. Tento nežádoucí jev



**Obr 4.3)** Ukázka aliasingu. Červená křivka je původní signál, černé body značí vzorkování a modrá křivka je chybně vyhodnocený signál (převzato z: [41])

vníká pod-vzorkováním signálu a vede ke znehodnocení původní informace signálu, jelikož je doprovázen vznikem falešných frekvencí. Jevu se dá předcházet použitím vhodných filtrů (analogový filtr dolní propust zařazený před převodníkem) nebo dodržením tzv. Nyquistovy vzorkovací frekvence, která musí být dvakrát větší než nejvyšší frekvence harmonické složky obsažené v signálu (tzv Shannonův teorém) [16]. Při měření s RTD může signál obsahovat nežádoucí síťovou harmonickou složku (50/60 Hz). Aby nedocházelo k aliasingu a aby bylo možné tuto složku filtrovat, měla by se použít vzorkovací frekvence alespoň 120 Hz.

Po navzorkování signálu provádí A/D převodníky kvantování. Počítače totiž mohou vyjádřit hodnotu vzorku jen s určitou přesností. Absolutní přesnost by opět vyžadovala nekonečně velkou paměť výpočetního zařízení. Tento proces má tedy za úkol zaokrouhlit reálnou hodnotu vzorku na nejbližší možnou hodnotu, se kterou umí daný systém pracovat. Rozdíl mezi reálnou a kvantovanou hodnotou se označuje jako kvantizační chyba a velikost této chyby klesá s počtem bitů převodníku. Převodníky pracují s binární soustavou a počet bitů udává, kolik kvantizačních úrovní převodník rozlišuje. Například 8bitový převodník rozlišuje 256 úrovní ( $2^8$ ), zatímco na výstupu 12bitového převodníku může být pozorováno 4096 různých hodnot ( $2^{12}$ ). Nejmenší rozlišitelný krok se určí jako podíl výstupního rozsahu napětí A/D převodníku a celkového počtu kvantizačních úrovní. Například pro dvanáctibitový převodník pracující s výstupním napětím 0 až 10 voltů je rozlišitelnost 0,00244 V. [19]

Při vzorkování nenávratně ztrácíme množství detailů z původního spojitého signálu. Kvantováním zase ztrácíme detailní hodnoty vzorků. Oba procesy jsou ovšem pro digitalizaci signálu nezbytné. Za účelem získat co nejpřesnější výsledky je samozřejmě možné zvolit vysokou vzorkovací frekvenci a převodník s vysokou rozlišitelností, avšak současně musíme brát v potaz zvyšující se nároky na výpočetní systém a komplikovanější práci s velkým množstvím dat.

## Typy A/D převodníků

Principiálně lze A/D převodníky rozdělit na převodníky s přímou a nepřímou konverzí. Přímou konverzi využívají například paralelní převodníky, které pomocí komparátorů srovnávají vstupní napětí s odstupňovaným referenčním napětím. Tyto převodníky jsou velmi rychlé, avšak dosahují nižšího rozlišení, protože musí obsahovat  $2^n - 1$  komparátorů (kde  $n$  je počet bitů převodníku) [20].

Nepřímé převodníky porovnávají napětí analogového signálu s hodnotou zpětnovazebního napětí (napětí generované D/A převodníkem). Převodník generovanou hodnotu neustále mění a opakovaným srovnáváním se přibližuje k hodnotě měřeného napětí až na nejbližší rozlišovací úroveň. Tento princip využívají například převodníky s postupnou aproximací, které se skládají z komparátoru, D/A převodníku a z registrů. Dalšími typickými zástupci nepřímých převodníků jsou integrační převodníky (integrační převodník, převodník napětí-frekvence či Sigma-Delta převodník). Jejich výhodou je především vysoká přesnost, avšak zákonitě dosahují nižších převodních rychlostí [20] [21].

Integrační převodníky digitalizují vždy průměrnou hodnotu měřeného napětí za určitý časový interval (nikoliv okamžitou hodnotu jako aproximační či paralelní převodníky),

takže vykazují dobrou odolnost vůči vnějšímu rušení [21]. Typickým zástupcem je převodník s dvojí integrací, který měří čas potřebný k nabití a vybití kapacitoru za účelem určit vstupní napětí. Sigma-Delta označuje integrační převodník, který tvoří analogový filtr, komparátor napětí, integrátor a zpětnovazební jednobitový D/A převodník. Výstupem převodníku napětí-frekvence je sled impulzů s frekvencí, která závisí na hodnotě měřeného napětí [21].

**Tab. 4.1)** Charakteristiky vybraných A/D převodníků (převzato z: [21])

Typ převodníku	Obvyklé rozlišení	Převodní rychlost*
Sigma-Delta	16-24 bit	1 sps–128 ksps
Aproximační	8-16 bit	10 ksps–2 Msps
Napětí-frekvence	8-12 bit	1 Hz – 4 MHz
Integrační	12–24 bit	1 sps–1 ksps

\*sps = *samples per second*

Vzhledem k vlastnostem RTD je potřeba zvolit takový převodník, který bude přesný a bude disponovat dostatečně velkým rozlišením. Některé převodníky umožňují pomocí zabudovaných přídavných okruhů zajistit také potřebný budící proud pro senzor. Ideálním převodníkem pro RTD jsou proto Sigma-Delta ( $\Sigma$ - $\Delta$ ) převodníky, které se hodí obecně pro měření stejnosměrného a pomalu se měnícího napětí [9] [13] [21]. Menší převodní rychlosti nejsou díky požadavku vzorkovací frekvence (minimálně 1 Hz) problémem.

#### 4.2.2 Zesílení signálu

V podkapitole 3.2, která se věnuje odporovým snímačům teploty, jsou nastíněné pracovní hodnoty elektrického proudu a odporu odporového snímače. Při teplotě 0 °C dosahuje odpor 100 $\Omega$  (pro PT100) a při teplotě 100 °C vzroste odpor přibližně na 140  $\Omega$ . Pokud budeme předpokládat maximální přípustný proud o velikosti 0,1 mA, pak se měřené napětí bude pohybovat v rozsahu 0,01 až 0,014 V (viz Ohmův zákon). Při použití PT1000 by se hodnoty zdesetinásobily. V obou případech ovšem narážíme na problém, že měřený rozsah představuje pouze zlomek výstupního napětí, se kterým pracují A/D převodníky.

Z předchozí podkapitoly věnované digitalizaci analogového signálu vyplývá, že 12bitový převodník s rozsahem výstupního napětí 10 V by dokázal na daném intervalu hodnot rozlišit přibližně jen 2 kvantizační úrovně. Vyšší rozlišitelnosti bychom dosáhly vyšším napětím na vstupu, což lze realizovat použitím snímače s vyšší jmenovitou hodnotou (např. PT1000). Abychom ovšem využili co největší část rozsahu převodníku, musíme použít zesilovač.

Zesilovač je zařízení, které zesiluje hodnoty napětí určitým koeficientem tak, aby se rozsah měřených hodnot co nejlépe přiblížil rozsahu A/D převodníků. Tím se zvyšuje citlivost a rozlišení měření. U střídavého proudu se zesiluje amplituda signálu, u stejnosměrného proudu úroveň signálu. Umístěním zesilovače těsně za senzor se navíc zlepšuje poměr signál-šum, protože nejprve dojde k zesílení signálu a až poté k ovlivnění šumem prostředí

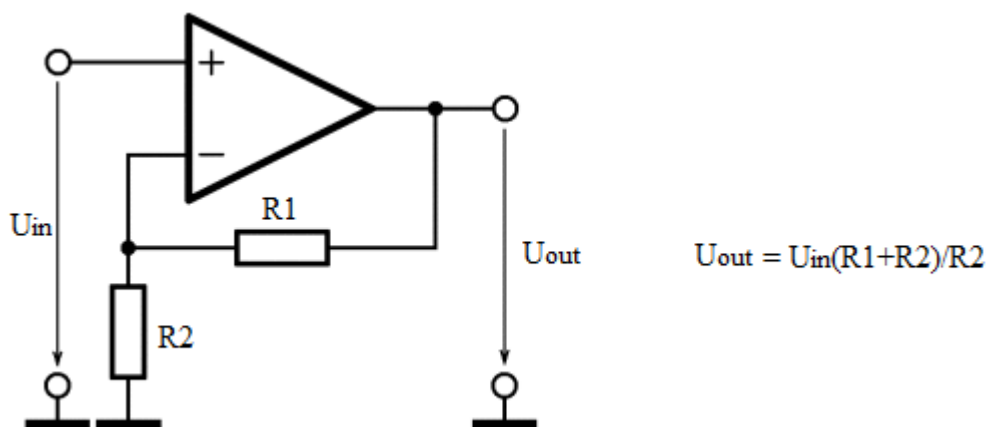
[22]. Pro zesílení analogového signálu v obvodu se stejnosměrným proudem se využívají operační zesilovače (zkráceně OZ).

Operační zesilovač je komplexní elektronická součástka se dvěma vstupy a jedním výstupem. Schématická značka může obsahovat také přívody napájení (obvykle jako svislé vodiče, na obr. 4.3 přívody napájení nejsou). Dle způsobu zapojení lze OZ využívat pro různé účely, avšak zde bude popsáno pouze zapojení OZ jako stejnosměrného zesilovače. Jeden vstup se označuje symbolem plus (neinvertující vstup) a druhý symbolem mínus (invertující vstup). Jeden ze vstupů je propojen s výstupem přes napěťový dělič a na druhý se přivádí napětí (např. ze snímače) [23]. Přivedením napětí na invertující vstup získáme na výstupu zesílený signál s opačnou fází (respektive opačnou polaritou). Dle maximálního rozsahu výstupního napětí je potřeba zvolit o něco vyšší napájecí napětí zesilovače [24]. Při měření s platinovými RTD je problémem nízký vstupní odpor, který může ovlivnit měřenou veličinu. Pro přesnější měření se proto používají přístrojové zesilovače (např. obvody AD524, AD625) [10].

Hlavním zdrojem chyb u zesilovačů stejnosměrného signálu je teplotní nestálost napětí vstupního tranzistoru (asi  $2\text{mV}/^\circ\text{C}$ ). Tato chyba je ovšem u operačních zesilovačů minimalizována [25]. Při používání zesilovačů je nutné myslet na to, že zesilovače zesilují jak požadovaný signál, tak šum. Aby se zamezilo zesílení nežádoucího šumu, lze před zesílením provést filtraci signálu (více podkapitola 4.2.4) [22].

V průmyslu se běžně využívají speciální měřicí zesilovače. Označení zesilovač zde ovšem není úplně správné, protože kromě zesílení signálu provádí tato zařízení i další úpravy signálu. Anglické texty obvykle operují s výrazem *measuring transducer*, což se překládá jako měřicí převodník. Nutno ale zdůraznit, že tyto převodníky nezajišťují A/D nebo D/A konverzi. Analogový signál je jak na vstupu, tak na výstupu. Převodem se zde rozumí převod jedné fyzikální veličiny na jinou, popřípadě převod hodnot fyzikální veličiny na odlišné hodnoty téže veličiny. [26]

Měřicí zesilovače se vytváří pro konkrétní aplikace, takže například měřicí zesilovače pro snímače PT100 vstupní signál kromě zesílení také linearizují.



**Obr. 4.4)** Stejnosměrný operační zesilovač – neinvertující zapojení – a vzorec pro výpočet výstupního napětí (převzato z: [24]; upraveno)

### 4.2.3 Linearizace signálu

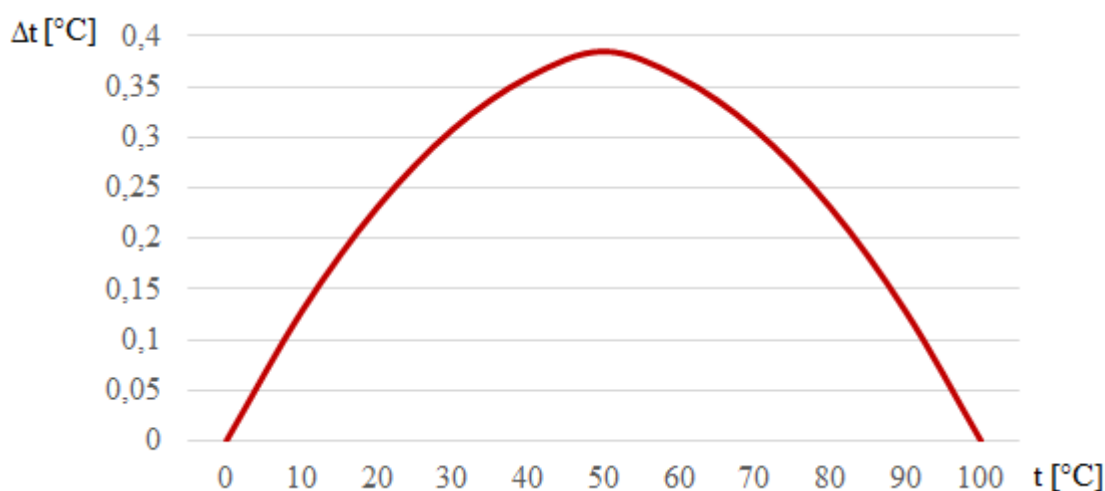
Linearizace se provádí v případě, že závislost napětí na senzoru není lineární s fyzikální veličinou, na které napětí závisí. Platinové RTD vykazují ve srovnání s ostatními teplotními snímači vysokou linearitu, avšak lineární nejsou. Proto se při měření ve větším teplotním rozsahu linearizace běžně používá. [22]

Pokud je potřeba linearizovat závislost analogově, pak se využívají nelineární prvky, jejichž charakteristika se podobá inverzní funkci k závislostní nelineární funkci [17]. U RTD je touto nelineární funkcí závislost napětí na teplotě. Linearizaci lze provádět ale také u digitálního signálu (softwarově) a to například za pomoci korekční tabulky nebo korekční funkce.

Pokud bychom u RTD (typ PT100 podle DIN 43760) předpokládali lineární závislost (rovnice 4.1), pak bychom se při měření teplot v zadaném rozsahu (0 až 100 °C) dopustili chyby téměř až 0,4 °C. Tuto chybu lze ovšem zredukovat na polovinu umělým „posunutím“ nuly o polovinu velikosti této chyby (rovnice 4.2) [27]. Pokud ale známe nelineární závislost (rovnice 3.3) a všechny potřebné koeficienty, tak můžeme tuto chybu potlačit. Použitím kvadratické rovnice, která zanedbává kubický člen, se na intervalu od 0 do 100 °C dopustíme chyby asi 0,014 °C [27]. Taková chyba je pro většinu aplikací a vzhledem k přesnosti většiny snímačů zanedbatelná.

$$t = \frac{\frac{R_t}{R_0} - 1}{\alpha} \quad (4.1)$$

$$t = \frac{\frac{R_t}{R_0} - 1}{\alpha} - 0,19 \quad (4.2)$$



**Obr. 4.5** Chyba pro daný teplotní interval, která vznikne zanedbáním nelinearity RTD (pro PT100 dle DIN 43760).



#### 4.2.4 Filtrace signálu

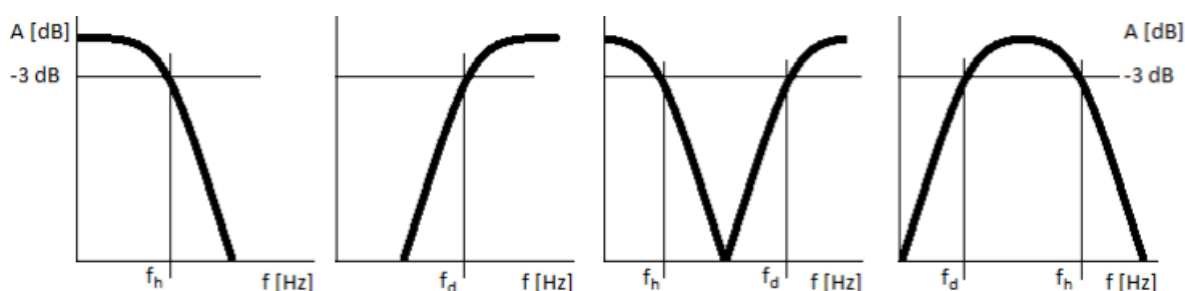
Filtrace je metoda zpracování signálu, při které se potlačuje určitá část frekvenčního spektra, aby se dosáhlo požadovaného výsledku [22]. Filtrací se tedy odstraňují nežádoucí harmonické složky signálu (např. frekvence šumu). K realizaci filtrace se používají frekvenčně selektivní filtry, jejichž účelem je propustit nebo potlačit složky signálu v určitém frekvenčním pásmu. [17] Vůbec nejčastěji se aplikují následující typy filtrů [28]:

*Dolní propust (Lowpass LPF): Odstraňuje vysoké frekvence ze signálu*

*Horní propust (Highpass HPF): Odstraňuje nízké frekvence ze signálu*

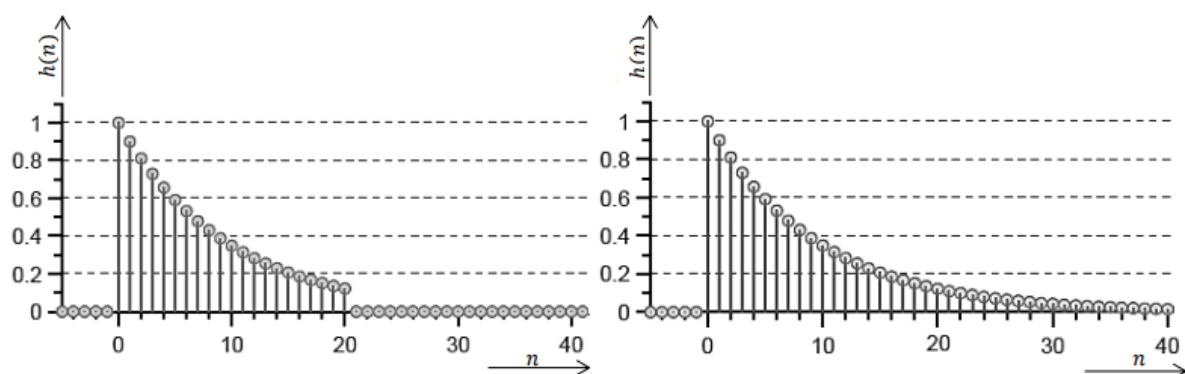
*Pásmová propust (Bandpass BPF): propouští frekvence z určitého pásma*

*Pásmová zádrž (Bandstop BSF): zadržuje frekvence určitého pásma*



**Obr. 4.6)** Frekvenční charakteristiky pro (zleva): LPF, HPF, BSF, BPF. Frekvence  $f_d$  a  $f_h$  značí bod zlomu. Snížením signálu o 3 dB poklesne výstupní signál přibližně o 30 %. Pro větší útlum lze využít pokles o 6 dB (snížení výstupního signálu o 50 %) nebo dokonce 20 dB (snížení o 90 %) (převzato z: [28]; upraveno)

Filtrování lze aplikovat jak u analogového signálu (analogové filtry), tak u digitálního signálu (softwarové číslicové filtry). Analogové filtry mají velký frekvenční rozsah a jsou poměrně levné. Výhodou číslicových filtrů je naopak vysoká přesnost a rychlost, možnost měnit softwarově parametry filtru a vysoký dynamický rozsah [17]. Vzorkovací frekvence A/D převodníku však určuje maximální frekvenční rozsah digitálních filtrů [28]. S ohledem na zadání této diplomové práce se bude následující část kapitoly věnovat výhradně číslicovým filtrům.



**Obr. 4.7)** Impulzní odezva filtrů FIR (vlevo) a IIR (vpravo) (převzato z: [28]; upraveno)



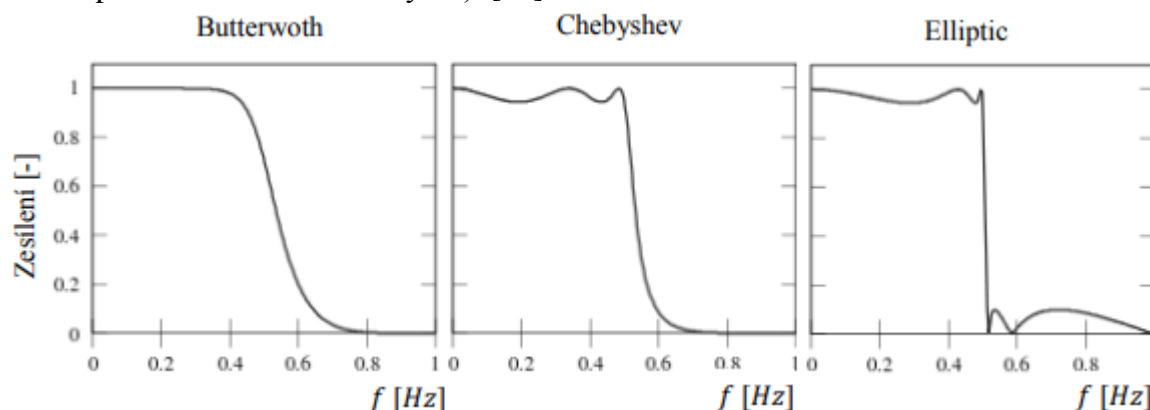
Podle délky impulzní odezvy (obr. 4.7) rozlišujeme filtry s konečnou impulzní odezvou (FIR) a filtry s nekonečnou impulzní odezvou (IIR). FIR filtry, které se někdy označují jako nerekurzivní filtry (nemají zpětnou vazbu), jsou vždy stabilní (výstupní odezva na každý konečný vstupní signál je konečná) a na rozdíl od IIR filtrů nemají analogovou podobu [17]. Díky stabilitě se vylučuje kmitání a délka impulzní odezvy je rovna řádu filtru. Další výhodou je, že filtr má obvykle lineární fázi (konstantní skupinové zpoždění), takže zpožďuje signál, ale nedeformuje jeho fázi. FIR filtry lze využít také při realizaci adaptivních filtrů, který mění své parametry v závislosti na změně vstupního signálu [17]. Díky těmto vlastnostem se filtry typu FIR v praxi využívají častěji než filtry typu IIR. Pro úplnost doplníme, že výhodou IIR je rychlost a nižší výpočetní náročnost. Mohou totiž dosahovat stejné úrovně útlumu jako FIR filtry, avšak s nižším řádem filtru. Zvyšováním řádu filtru dochází k vyššímu útlumu, ale také k vyššímu zpoždění a vyšší náročnosti na výpočet.

**Tab. 4.2)** Rozdíly FIR a IIR filtrů [21].

Filtr	FIR	IIR
Zpětná vazba	nemá zpětnou vazbu	má zpětnou vazbu
Impulsní odezva $h$	celkem $N$ hodnot	nekonečná
Zpoždění	$T_d = (N - 1)/2$	není lineární
Vždy stabilní	Ano	Ne
Počet koeficientů rovnice	$N+1$	$N+M+1$
Diferenční rovnice	$y_n = \sum_{k=0}^N x_{n-k} h_k$	$y_n = \sum_{k=0}^N x_{n-k} h_k + \sum_{m=1}^M y_{n-m} l_m$
<i>x- signál vstup; y- signál výstup; N- řád filtru (M- řád zpětné vazby); h,l- koeficienty impulsní odezvy</i>		

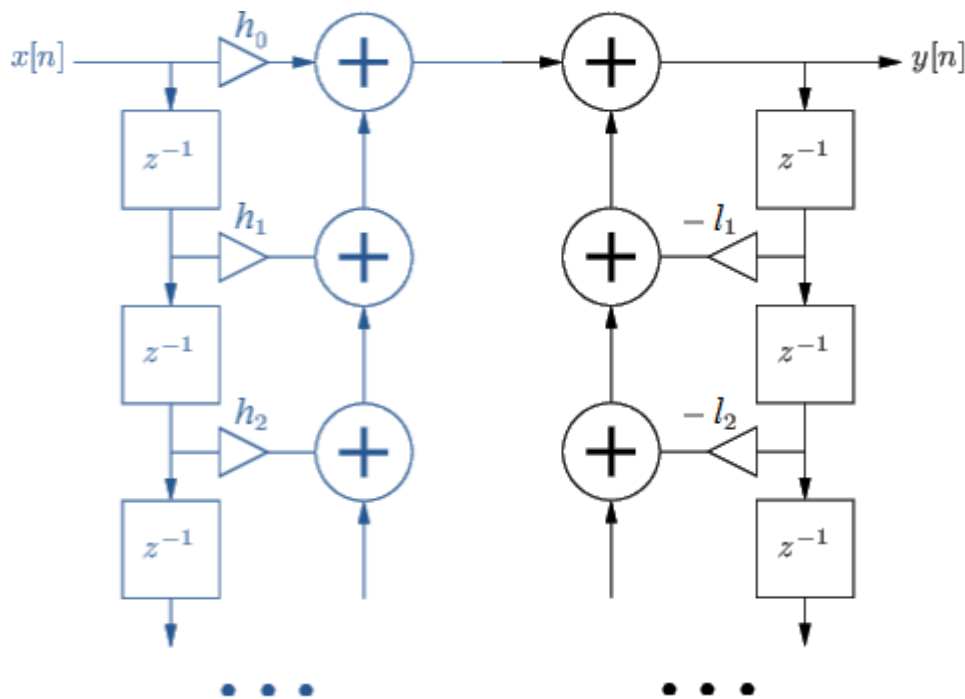
FIR filtry se nejčastěji realizují pomocí metody vzorkování frekvenční charakteristiky, metody váhové posloupnosti nebo optimalizační metody. Nejvyužívanější je metoda váhové posloupnosti, která k omezení nekonečné impulsní charakteristiky využívá tzv. oken. Typ okna je jedním z hlavních parametrů filtru, jelikož ovlivňuje útlum i chybu filtru.

IIR filtry se realizují optimalizačními metodami nebo aproximací frekvenční charakteristiky filtru, kdy se využívá podobnosti s analogovými filtry (Čebyšev, Betterworth, eliptická aprox. nebo inverzní Čebyšev). [28]



**Obr. 4.8)** Frekvenční charakteristika základních aproximací. (převzato z: [28] ;upraveno)

V praxi nacházejí filtry široké uplatnění jako nástroje pro potlačení šumu, zvýraznění některých frekvenčních pásem nebo k odstranění specifických frekvencí ze signálu [22]. Při měření s RTD se často využívá pomalé vzorkování, takže měření je náchylné k vysoko-frekvenčnímu šumu sítě o frekvenci 50 Hz (respektive 60 Hz pro USA síť). Za účelem potlačit tento šum se běžně využívají LPF [22].



**Obr. 4.9)** Schéma IIR filtru. Modrá část značí dopřednou vazbu (FIR filtr) a černá část rekurzivní (zpětnou) vazbu. (převzato z: [45]; upraveno)

#### 4.2.5 Další metody zpracování signálu

Výše uvedené metody zpracování signálu hrají při realizaci měřicího pracoviště s RTD velmi důležitou roli, avšak představují jen zlomek dostupných metod k úpravě signálu. U některých dalších metod se nyní velmi stručně zastavíme.

Jak již bylo uvedeno dříve, RTD jsou pasivní snímače, které ke svému fungování potřebují externí zdroj proudu nebo napětí. Proces buzení napětí vnějším zdrojem se označuje jako excitace. Pokud bychom chtěli napájet zařízení ze zdroje střídavého proudu, bylo by potřeba proud převést na stejnosměrný. Za tímto účelem se využívají usměrňovače (převod na stejnosměrný proud) a filtrační kondenzátory (pro následné vyhlazení signálu). Pro měřicí pracoviště s RTD je ovšem takové řešení zbytečně komplikované. Jako zdroj může vystačit i samotný počítač. Například sběrnice USB totiž slouží nejen k přenosu digitálních dat, ale připojeným zařízením může poskytovat i napájecí stejnosměrné napětí 5 V [27].

#### 4.2.6 Analýza dat

Digitální signál je reprezentovaný diskrétními hodnotami, a proto je vhodné zvážit, jak lze s těmito hodnotami jako s daty dále nakládat. Následující kapitola bude pojednávat o vybraných statistických veličinách a matematických metodách, které mohou mít praktický význam při zpracovávání dat.

##### Klouzavý průměr

Při měření signálu se můžeme více či méně potýkat s šumem, který způsobí kmitání naměřených hodnot kolem ideální polohy. Jednoduchým, a přesto účinným způsobem, jak snížit intenzitu výkyvů v reálném čase, je použití klouzavého průměru. Jednoduchý klouzavý průměr vždy sečte  $N$  posledních naměřených hodnot a vydělí je jejich počtem. Ve své podstatě se tedy jedná o dynamický aritmetický průměr posledních  $N$  hodnot. Z výše uvedeného vyplývá, že klouzavý průměr potlačí šum a umožní lépe sledovat trendy ve vývoji měřené veličiny. Současně však sníží citlivost měřicího systému na rychlé a výrazné výkyvy měřené veličiny, které odhalí až s určitým časovým odstupem od reálného signálu [29]. Matematicky lze rovnici pro jednoduchý klouzavý průměr vyjádřit následovně:

$$y_i = \frac{1}{N} * \sum_{j=0}^{N-1} x_{i-j} \quad (4.3)$$

kde:  $y_i$  =  $i$ -tá hodnota výstupního signálu  
 $x_i$  =  $i$ -tá hodnota vstupního signálu  
 $N$  = počet bodů zahrnutých do klouzavého průměru

##### Aritmetický průměr

Aritmetický průměr je statistická veličina, která se vypočítá jako součet naměřených hodnot vydělený jejich počtem. Aritmetický průměr lze aplikovat pro hodnoty z celého měření i pro vybrané intervaly [29]. Tuto veličinu lze využít pro určení průměrné hodnoty teploty z měření.

$$\bar{x} = \frac{1}{N} * \sum_{j=1}^N x_i \quad (4.4)$$

kde:  $\bar{x}$  = aritmetický průměr  
 $x_i$  =  $i$ -tá hodnota vstupního signálu  
 $N$  = počet zaznamenaných bodů diskrétního signálu

##### Výběrová směrodatná odchylka

Důležitou statistickou veličinou je také výběrová směrodatná odchylka. Tato veličina popisuje, jak výrazně se obvykle liší jednotlivé naměřené jednotky souboru. Určí se jako kvadratický průměr odchylek hodnot od aritmetického průměru souboru [29]. S rostoucím šumem

se logicky bude zvětšovat i výběrová směrodatná odchylka, protože amplituda rozkmitu se bude vzdalovat od aritmetického průměru. Výběrová směrodatná odchylka i aritmetický průměr se využívají také při výpočtu nejistoty typu A při kalibraci měřicího zařízení. O kalibraci platinových RTD je blíže pojednáno v kapitole 7.

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} * \sum_{j=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.4)$$

kde:  $s$  = výběrová směrodatná odchylka

$x_i$  =  $i$ -tá hodnota vstupního signálu

$\bar{x}$  = aritmetický průměr

$N$  = počet zaznamenaných bodů diskrétního signálu

Dvě výše uvedené veličiny se používají výhradně pro popis výběrových souborů, což má své odůvodnění. Vzorkování analogového signálu je ve své podstatě systematickým výběrem dílčích hodnot z nekonečné množiny hodnot analogového signálu. Digitální signál lze proto ze statistického hlediska považovat za výběrový soubor k základnímu statistickému souboru (kterým jsou hodnoty analogového signálu).

## Interpolace a aproximace

Při zpracovávání dat se může stát, že budeme potřebovat vybrané body (nebo třeba aritmetické průměry pro dané časové intervaly) proložit křivkou. Za tímto účelem se využívá interpolace nebo aproximace. Interpolace je matematická metoda, jejíž cílem je proložit křivku všemi požadovanými (například naměřenými body). Obecně platí, že  $N$  bodů je možné interpolovat polynomem  $N-1$  řádu. To ovšem pro velké množství dat není příliš praktické. Charakter takové křivky je navíc pro měření teploty nehodný (vyšší řád polynomu znamená vyšší fluktuaci).

Pokud bychom se rozhodli proložit  $N$  naměřených bodů polynomem nižšího řádu než  $N-1$ , pak už nebude výsledná křivka procházet všemi body. Obecně lze aproximaci využít na proložení naměřených bodů spojitou křivkou, která nám umožní určit přibližnou hodnotu teploty v libovolném bodě. V takovém případě se již nejedná o interpolaci, nýbrž o aproximaci [30]. Obě tyto metody mohou najít uplatnění v případě, že bychom chtěli z naměřených hodnot vytvořit grafický výstup, který bude reprezentovat dlouhodobé změny teplot (trendy) během měření.

## Analýza frekvenčního spektra

Každý periodický signál lze složit sečtením harmonických signálů. U neperiodických signálů by bylo nutné nekonečné množství harmonických funkcí. Pokud lze signál popsat matematickou funkcí nebo posloupností, pak se jedná o deterministický signál. U těchto signálů lze analyzovat charakteristiky signálu v časové, ale i frekvenční oblasti [18]. V případě signálu z RTD snímače se sice jedná o stejnosměrný napěťový signál, nicméně

přítomnost harmonických složek se vyloučit nedá. Za účelem odhalit harmonické složky v signálu se provádí analýza frekvenčního spektra. Ze závislosti amplituda-čas lze Rychlou Fourierovou transformací získat závislost amplituda-frekvence.

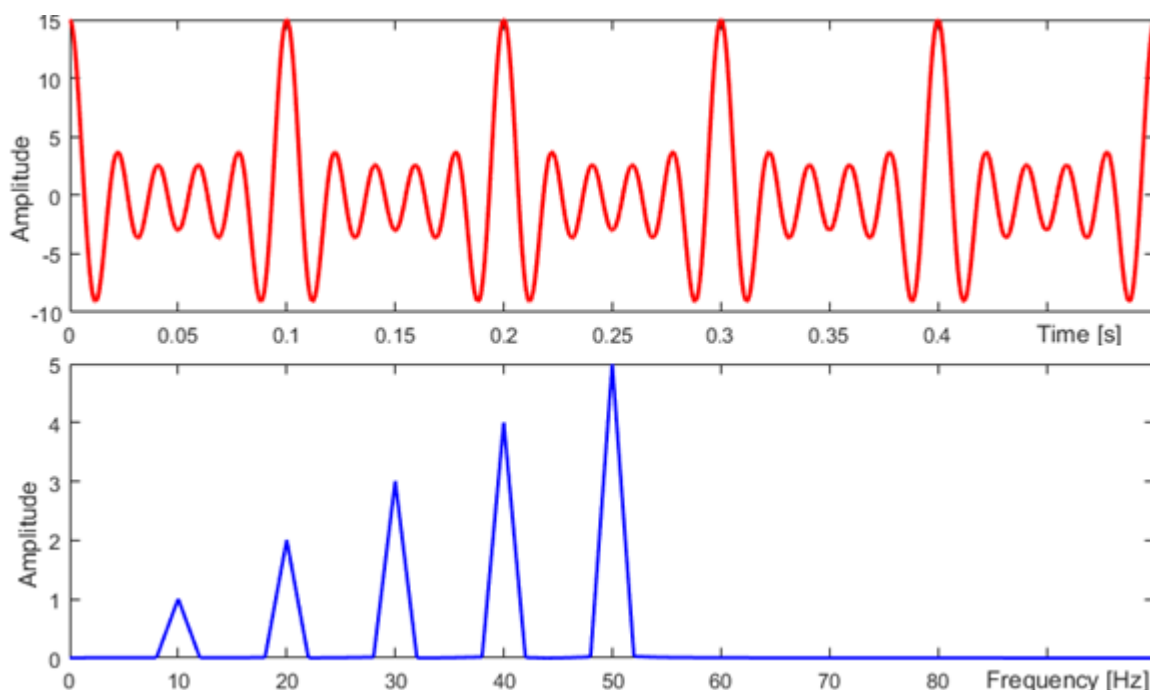
Rychlá Fourierova transformace (FFT) je souhrnné označení pro algoritmy, které umožňují výpočet Diskrétní Fourierovi transformace (DFT, rovnice 4.5) nebo její inverze (IDFT, rovnice 4.6). Při zpracování signálu se tento algoritmus používá pro převedení signálu z časové oblasti do oblasti frekvenční (obr. 4.10).

$$b_j = \sum_{k=0}^{N-1} a_k e^{2\pi i j k / N} \quad (4.5)$$

$$a_k = \frac{1}{N} * \sum_{j=0}^{N-1} b_i e^{-2\pi i j k / N} \quad (4.6)$$

*kde:  $i$  = imaginární jednotka  
 $j, k$  = indexy  
 $b$  = vektor v časové oblasti o  $N$  komplexních složkách  
 $a$  = vektor ve frekvenční oblasti o  $N$  komplex. složkách*

Nevýhodou DFT je časová a výpočetní náročnost. Výpočet totiž vyžaduje  $N^2$  komplexních operací. Metody FFT ovšem pro stejnou úlohu vyžadují méně operací – minimálně však  $N \log(N)$ . Pokud je například velikost souboru  $x$ -tou mocninou 2 ( $N=2^x$ ), lze výpočet zredukovat na  $N \log_2(N)$  operací. Toho se běžně využívá, nicméně velikost souboru se obvykle musí upravit přidáním nul (aby  $N=2^x$ ). Například pro  $N=4096$  znamená využití FFT téměř tisíckrát méně výpočetních operací, než při výpočtu DFT.



**Obr. 4.10)** Signál v časové (nahore) a frekvenční (dole) oblasti. (převzato z: [41])

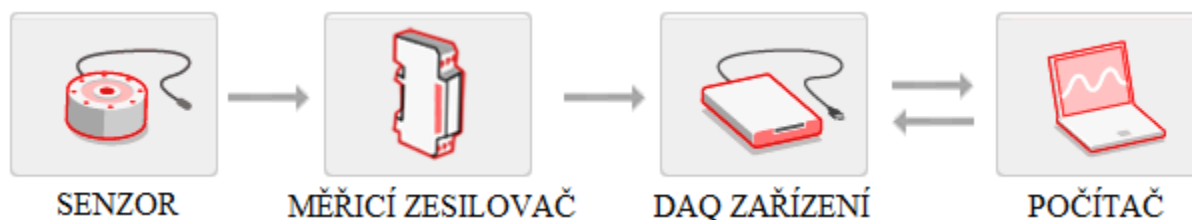
## 5 NÁVRH A REALIZACE MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ

Následující kapitola se zabývá hardwarovými prvky, ze kterých je měřicí řetězec sestaven. Všechny komponenty splňují požadavky uvedené v zadání této práce a byly k sestavení měřicího zařízení předem přiděleny. Kromě stručného popisu každého prvku a uvedení důležitých parametrů je uvedeno také porovnání s konkurenčními produkty.

### 5.1 Systém sběru dat

Pod pojmem zpracování dat se rozumí proces (dnes obvykle automatizovaný), který převádí naměřená data na informace. Komponenty, které měření a převod dat zajišťují, musí být voleny s ohledem na požadavky a vzájemnou kompatibilitu.

Měření teploty odporovými snímači je jednou z mnoha metod měření fyzikálních veličin. Měření fyzikálních veličin s využitím personálních počítačů se souhrnně označuje jako sběr dat neboli DAQ (z anglického Data acquisition). Systém pro sběr dat se obecně skládá ze senzoru, který snímá určitou fyzikální veličinu, měřicího zesilovače, převodníku a počítače se speciálním softwarem, kterým data zobrazuje [31]. Při měření teploty odporovými senzory získáváme stejnosměrný analogový signál, jehož průběh v čase je náhodný. Nezávislou proměnnou signálu je čas a závislou proměnnou je napětí. Teplota se určuje až následnými převody. Měřicí zesilovač zvyšuje rozsah napětí vystupujícího ze snímače a DAQ karta slouží k digitalizaci zesíleného signálu. Do počítače jsou data přeneseny pomocí USB sběrnice.



**Obr. 5.1)** Systém sběru dat (převzato z: [31]; upraveno)

### 5.1.1 Senzor

Senzor, označovaný též jako snímač, převádí zkoumanou fyzikální veličinu na měřitelný elektronický signál (odpor, proud, napětí nebo jiná elektrická veličina, která se mění v čase). Teorie platinových RTD byla rozebrána v předchozích kapitolách, a proto se jí již nebudeme zabývat. V tabulce 5.1 jsou uvedeny některé modely PT100 dostupné na českém trhu.

**Tab. 5.1)** Srovnání vybraných RTD senzorů. Parametry převzaty z katalogových listů, uvedené ceny jsou orientační.

Model	Typ	Zapojení	Rozsah [°C]	Třída	Cena
WZP-PT100	PT100	2vodičové	-60; +200	-	52 CZK
W-EYK6 PT100	PT100	2vodičové	-40; +500	B	350 CZK
GUENTHER 72-KFW	PT100	3vodičové	-30; +180	B	482 CZK
RS Pro 896-8395	PT100	3vodičové	-20; +100	A	520 CZK
Emko RTS-M06-L050-K02	PT100	3vodičové	-50; +200	B	550 CZK
Baumer teplotní čidlo	PT100	4vodičové	-50; +205	B	od 1085 CZK

#### Použitý model: EMKO RTS-M06-L050-K02

Jako senzor teploty byl k dispozici odporový snímač PT100 s třemi výstupními vodiči. Jedná se o senzor třídy B dle platné normy DIN/EN/IEC 60751 s délkou přívodního kabelu 2 m [32]. Pravdou je, že PT100 má oproti PT1000 horší rozlišitelnost a vyšší citlivost na chyby vzniklé vlastním zahříváním a chyby vlastního odpor přívodních vodičů. Pro řešení zadaného úkolu ovšem délka vodičů nepřesáhne kritickou délku (3 m), u které NI doporučuje kompenzaci. Tato chyba se navíc výrazně redukuje díky použitému třívodičovému zapojení. Nežádoucí vlastní zahřívání snímače se minimalizuje použitím dostatečně nízkého průchozího proudu.

Ve prospěch PT100 mluví některé zdroje, podle kterých PT100 dosahuje vyšší přesnosti než PT1000. To by také vysvětlovalo, proč je tento typ v průmyslu více používán.



**Obr. 5.2)** Použitý senzor, model EMKO RTS-M06-L050-K02 (převzato z: [32])

### 5.1.2 Měřicí zesilovač

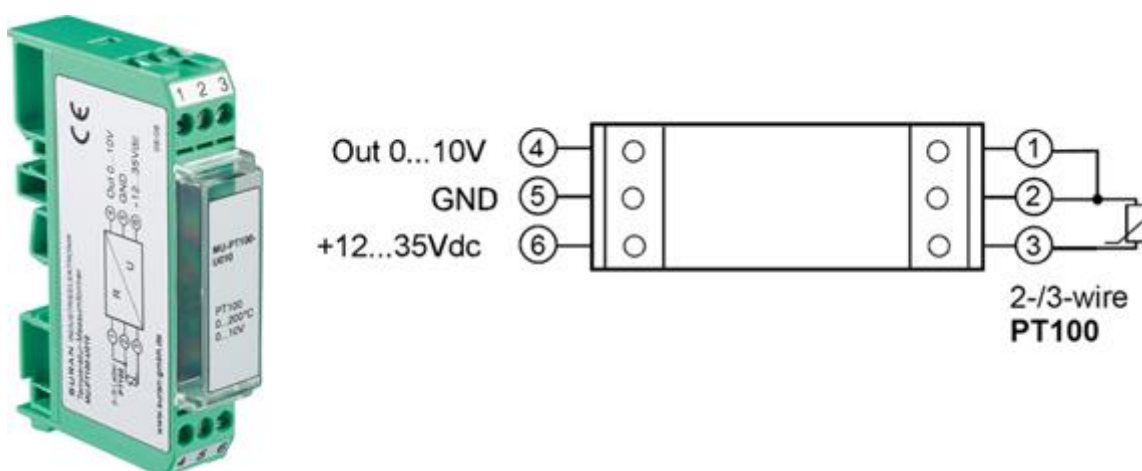
Pro měření teploty pomocí odporových snímačů se běžně používají speciální měřicí převodníky. Tyto převodníky zajišťují excitační proud pro senzor, linearizují vstupní napětí a zvyšují jeho rozsah (a tím pádem i rozlišitelnost) zesílením. Na trhu jsou dostupné převodníky pro kovové odporové snímače i termočláanky, avšak modelů pro PT100 je nejvíce. Měřicí zesilovače pro PT100 vyžadují zdroj stejnosměrného napětí 12-35 V, takže nemohou být napájeny z USB portu.

**Tab. 5.2)** Srovnání vybraných analogových měřicích převodníků pro PT100. Parametry jsou převzaty z katalogových listů, uvedené ceny jsou orientační.

Model	Zapojení	Rozsah [°C]	Výstup	Cena
Hygrosens PT-MOD-10V-T3	3vodič.	0; +300	0-10 [V]	850 CZK
Enda MU-PT100-I420-50/100	2/3vodič.	-50; +100	4-20 [mA]	1600 CZK
BAUMER 2301-0001	2-4vodič.	-200; +850	4-20 [mA]	1800 CZK
Enda MU-PT100-U010-0/200	2/3vodič.	0; +200	0-10 [V]	1900 CZK
Schneider El. RMPT73BD	2-4vodič.	0; +500	0-10 [V]; 4-20 [mA]	2000 CZK
Mercos PP 03	2-4vodič.	0; +1200	0-10 [V]; 4-20 [mA]	3000 CZK

#### Použitý model: SURAN MU-PT100-U010 (Enda MU-PT100-U010-0/200)

Pro zesílení signálu byl využit analogový měřicí zesilovač MU-PT100-U010. Měřicí zesilovač je speciálně určen pro měření teploty pomocí 2/3vodičového senzoru PT100 v rozsahu 0 °C až 200 °C. Výstupní hodnoty jsou reprezentovány pomocí signálu napětí mezi výstupy 4 a 5 o velikosti 0–10 V, přičemž závislost napětí a teploty na výstupu je lineární. Z toho vyplývá, že zařízení vstupní signál ze snímače nejen zesiluje, ale také linearizuje. Navíc funguje jako zdroj budicího proudu pro pasivní senzor. Dle datových listů dosahuje tento konkrétní měřicí zesilovač přesnosti 0,1 %. [32]



**Obr. 5.3)** Použitý měřicí zesilovač a schéma zapojení, model Enda MU-PT100-U010-0/200 (převzato z: [32]; upraveno)



### 5.1.3 DAQ zařízení

DAQ zařízení tvoří fyzický článek mezi snímačem a počítačem. Některá DAQ zařízení zajišťují kromě přenosu signálu také jeho úpravu (zesílení vstupního signálu, filtraci nežádoucího šumu, buzení el. proudu a digitalizaci) [8]. Pro dosažení přesných výsledků při měření jsou ideální DAQ zařízení, která jsou pro danou úlohu optimalizována. Několik komerčních DAQ zařízení, které pracují s PT100 snímači a jsou napájené USB sběrnici, je uvedeno v tabulce 5.3. Hlavní výhodou DAQ karet je snadné a všestranné použití. Nevýhodou je naopak vyšší pořizovací cena, která se pohybuje v řádech tisíců až desetitisíců korun.

**Tab. 5.3)** Srovnání vybraných DAQ zařízení. Parametry jsou převzaty z katalogových listů, uvedené ceny jsou orientační.

Model	Přesnost	Rozlišení	Vzorkování	Rozsah měření	Cena
Yocto-PT100	$\pm 0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$	$0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$	15 Hz	-200 až $325\text{ }^{\circ}\text{C}$	2 000 Kč
UA30	$\pm 0.625\text{ }^{\circ}\text{C}$	$0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$	2 Hz	-200 až $300\text{ }^{\circ}\text{C}$	1 200 Kč
USB-TEMP	$\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$	24-bit	2 Hz	dle snímače	13 000 Kč
NI-9210	$\pm 0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$	24-bit	14 Hz	dle snímače	9 600 Kč
NI-9217	$\pm 0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$	24-bit	400 Hz	dle snímače	16 400 Kč
NI USB-6008	$\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$	12-bit	150 Hz	dle snímače	4 000 Kč

#### Použité DAQ zařízení: Karta NI USB-6008

Jako DAQ zařízení byla použita karta NI USB-6008 od společnosti National Instruments. Karta má 4 vstupní analogové kanály a jeden kanál výstupní. Analogové porty jsou označeny čísly 1 až 16. Porty 17 až 32 slouží jako digitální I/O. Karta NI je propojena s počítačem pomocí rozhraní USB 2.0, které slouží nejen k přenosu dat, ale také k napájení karty. Signál z analogových vstupů se převádí pomocí integrovaného 12bitového převodníku s maximální vzorkovací frekvencí až 150 Hz. [33]



**Obr 5.4)** Použité DAQ zařízení a schéma vstupů, model NI USB-6008 (převzato z: [33]; upraveno)

#### 5.1.4 Počítač

DAQ karty jsou obvykle kontrolovány počítačovými programy, které mohou využívat různé programovací jazyky (C, C++, C#, Java, LabVIEW, Pascal...) [33]. Ve srovnání s tradičními měřicími systémy jsou kombinace DAQ karet a počítačů výkonnější, flexibilnější, a především méně nákladné. Výstupní informace mohou mít podobu grafu, čísel nebo jiných znaků a popisují měření v reálném světě [34].

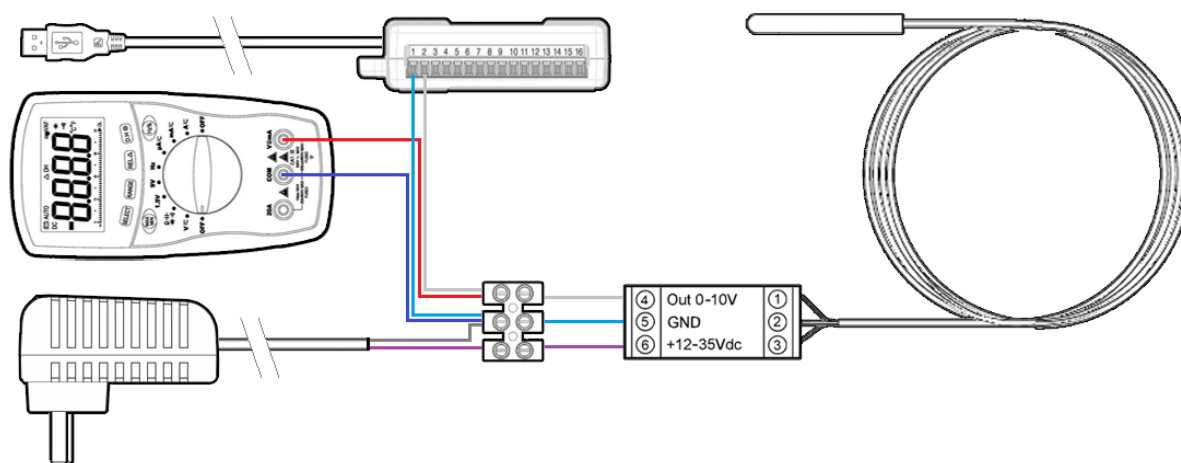
Programování v LabVIEW a komunikace s DAQ kartou nevyžaduje obvykle žádné nadstandartní požadavky, takže je zvládají i běžné personální počítače. Musí se ovšem zajistit, aby měl počítač nainstalovaný příslušný ovladač k rozpoznání DAQ karty a jejího signálu. Pro LabVIEW se jedná o ovladače série NI-DAQmx. Konkrétní verze ovladače se volí tak, aby byla kompatibilní s operačním systémem i používanou verzí programu.

## 5.2 Zapojení měřicího obvodu

Senzor se připojí k měřicímu zesilovači podle schématu (obr. 5.3). Měřicí zesilovač je napájen ze sítě externím zdrojem, který je přiveden na výstupy 6 a 5. Mezi výstupy 4 a 5 se měří napětí, jehož velikost závisí na teplotě zaznamenané senzorem. Vodiče z konektorů 4 a 5 jsou přivedeny na libovolný analogový kanál DAQ zařízení (konektory GRD a AI+).

Při měření teploty 0-100 °C a s použitím uvedeného měřicího převodníku můžeme očekávat výstupní hodnoty napětí v rozsahu 0–5 V. Vzhledem k tomu, že použitá DAQ karta umožňuje současně zapojit až 4 analogová zařízení (4 kanály), byl program testovaný i pomocí potenciometru (AMPHENOL typ P32221 B) napojeného na 9 V baterii. Pomocí potenciometru lze simulovat napětí v očekávaném rozsahu. Jak bude uvedeno dále, toho lze dosáhnout i virtuálně pomocí programu LabVIEW.

Pro ověření, že napětí vstupující do A/D převodníku (DAQ karty) a napětí odečítané v programu jsou shodná, byl použit multimetr zapojený přes svorkovnici na výstup z měřicího převodníku.



**Obr. 5.5)** Schéma zapojení měřicího systému (včetně multimetru)

### 5.3 Určení významných parametrů

Rozlišení použitého A/D převodníku je 12 bitů při měřitelném rozsahu -10 až +10 V. Při nastavení převodníku na rozsah 0 až 10 V (což LabVIEW umožňuje) se sníží rozlišení převodníku na 11 bitů. Pro měření s daným měřicím zesilovačem lze použít oba způsoby bez dopadu na velikost kvantizačního kroku. Jeho velikost se určí následujícím vztahem:

$$R_{A/D} = \frac{U_{max} - U_{min}}{2^{rp}} = \frac{(10 - (-10))}{2^{12}} = \frac{20}{4096} = 0,00488 \text{ [V]} \quad (5.1)$$

kde:  $rp$  = rozlišení převodníku v bitech  
 $U_{max}, U_{min}$  = napěťový rozsah převodníku [V]  
 $R_{A/D}$  = rozlišitelnost převodníku [V]

Převodník tedy kvantuje signál s krokem necelých 0,005 V, což s použitým zesilovačem znamená rozlišitelnost přibližně 0,1 °C. V tabulce 3.1 je uvedeno, že tolerance snímače třídy B je při 0 °C až 0,3 °C. V dalších kapitolách bude dokázáno, že krok 0,1 °C je vzhledem k přesnosti měřicího zařízení více než dostačující.

Zesílení použitého zesilovače nelze určit ani s informacemi z datového listu. Výrobce totiž neuvádí velikost excitačního proudu. Podobné produkty (BAUMER a Hygrosens v tabulce 5.2) ale využívají budicí proud 0,3 mA. Neznámý je také způsob zapojení senzoru. V podkapitole 3.2.4 byly naznačeny dva možné způsoby, jak měřit změnu odporu na RTD s třemi vodiči. Měření přes Wheatstonův můstek má oproti jednoduchému obvodu tu výhodu, že ve vyváženém stavu je napětí mezi vrcholy můstku nulové. Do protilehlé větve se obvykle zapojí odpor 100 ohmů (pro PT100), aby byl můstek vyvážený při 0°C. Změnou odporu RTD v jedné větvi se můstek rozladí a nulové napětí se začne měnit. Výhodou tedy je, že měření začíná na hodnotě 0 V (při 0 °C), což usnadňuje následné zesílení a umožňuje využít co největší rozsah A/D převodníku. Při linearizaci signálu jsou obvykle zachovány krajní hodnoty měřitelného rozsahu. Pokud bychom předpokládali standardní provedení (Wheatstonův můstek, zachování krajních hodnot při linearizaci a excitační proud 0,3 mA), tak můžeme zesílení odhadnout:

$$G_{(t=max)} = \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{U_{out}}{R_{200} * I_{EX}} = \frac{10}{175,856 * 0,0003} = 189,549 \quad (5.2)$$

kde:  $G_{(t=max)}$  = Zesílení v krajní hodnotě rozsahu [-]  
 $U_{out}, U_{in}$  = Napětí na výstupu a vstupu zesilovače [V]  
 $R_{200}$  = Odpor RTD při 200 °C dle ČSN EN 60751 [Ω]

Tento výpočet je založen na výše uvedené úvaze a výsledek se nemusí shodovat se skutečností. Postup lze ovšem aplikovat na libovolný zesilovač, u kterého známe potřebné parametry.

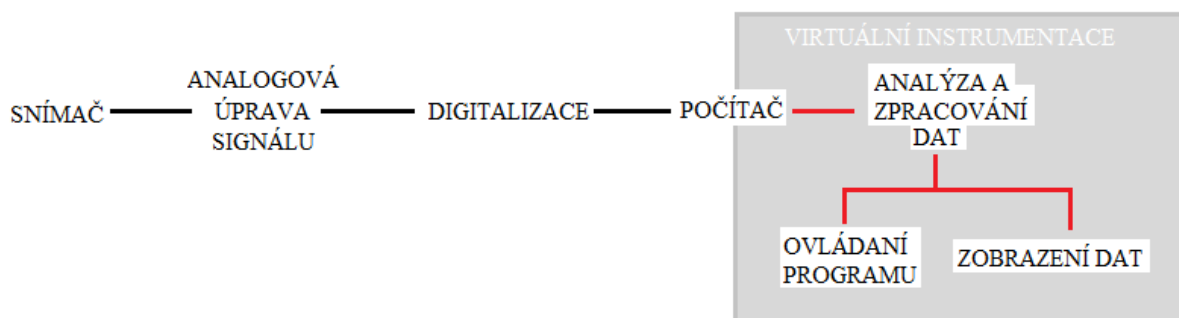
## 6 NÁVRH A REALIZACE PROGRAMU

Následující kapitola se věnuje programu, který byl pro měření s RTD vytvořen, a použitému programovacímu prostředí LabVIEW.

### 6.1 LabVIEW

K realizaci zadaného úkolu bylo využito programovací a vývojové prostředí LabVIEW, které je produktem americké společnosti National Instruments. LabVIEW využívá prostředí s tzv. grafickým programovacím jazykem (G-jazyk) a nachází uplatnění při programování systémů pro měření a analýzu signálu. LabVIEW slouží k tvorbě virtuální instrumentace, jejíž cílem je nahradit časově či finančně nedostupný fyzický hardware virtuálním řešením za využití virtuálních přístrojů (instrumentů). Tyto instrumenty lze v programu propojovat virtuálními vodiči a vytvářet tak komplexní systémy v podobě blokových diagramů, bez nutnosti textového programování [35].

Programy vytvořené v LabVIEW se označují jako virtuální instrumenty (zkráceně VI). Jejich funkce nahrazuje fyzické nástroje jako jsou třeba multimetry nebo analogové filtry. Každý program využívá řadu funkcí, které převádí data ze vstupního modulu podle vytvořeného blokového diagramu do podoby výstupní informace. Virtuální Instrumenty lze následně převést do podoby EXE aplikací, které mohou být spuštěny i bez instalace LabVIEW [18].



**Obr. 6.1)** Schéma virtuální instrumentace LabVIEW

LabVIEW nabízí řadu výhod pro průmyslové i laboratorní využití. Program se využívá pro sběr dat, analýzu a zpracování signálu nebo řízení experimentů. LabVIEW podporuje hardwarové sběrnice i DAQ karty a s měřicím hardwarem komunikuje i přes rozhraní, která jsou běžně součástí osobních počítačů (USB, Ethernet). Program nevyžaduje znalost programovacích jazyků, poskytuje intuitivní uživatelské rozhraní a umožňuje tvorbu komplexních systémů, které mohou obsahovat i dílčí podprogramy (subVI) [35].

#### 6.1.1 Programovací prostředí LabVIEW

Virtuální instrumenty vytvořené v programu LabVIEW se skládají ze dvou částí. První část je čelní panel (Front Panel), který slouží k ovládní VI a k zobrazování výstupních informací. Panel může obsahovat ovládací prvky (tlačítka, otočné či posuvné knoflíky) a indikátory (grafy, textová pole, světelné diody). Jedná se o uživatelský panel, který je určen k obsluze

programu. Právě s tímto panelem se bude běžný uživatel setkávat, takže by měl být dostatečně intuitivní a měl by obsahovat všechny nezbytné prvky. Samotný program je potom uložen v grafické podobě v blokovém diagramu, který představuje druhou část VI.

Pro grafický programovací jazyk jsou charakteristické bloky (ikony), které reprezentují jednotlivé konstrukční prvky (např. vstupní data, logické operátory, ale i komplexní součásti...). Souhrnná funkce programu je dána strukturou blokového schématu a navolenými vztahy mezi jednotlivými bloky. Každý blok představuje určitou funkci a programátor je navzájem spojuje virtuálními vodiči, které značí tok dat v celém systému. Tato bloková schémata tak nahrazují klasické textové kódy [35] [18]. Také prvky z čelního panelu jsou součástí blokového diagramu a zobrazují se jako příslušné ikony (terminály).

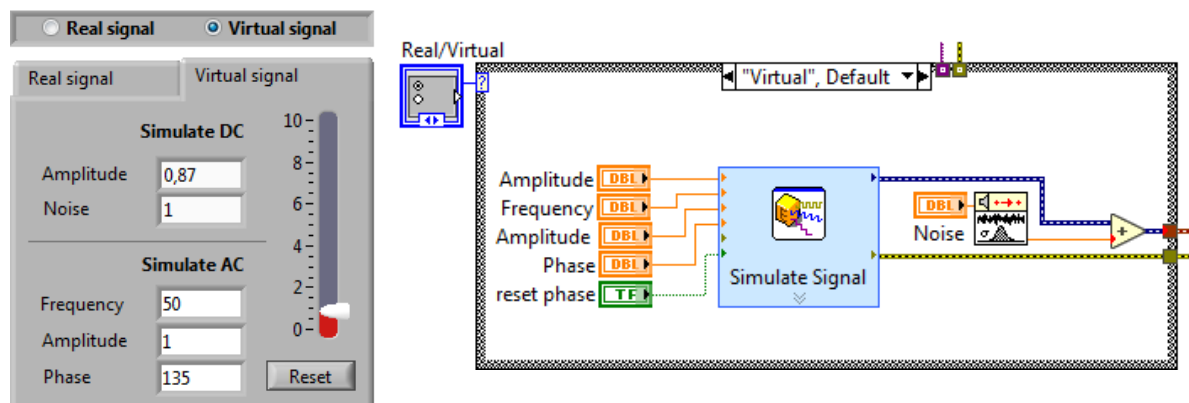
## 6.2 Elementární prvky vytvořeného programu

Následující část diplomové práce složí jako příručka k vytvořenému programu. Jednotlivé prvky programu jsou rozřazeny do podkapitol, kde je uvedeno, proč je daný prvek součástí programu, jak byl prvek realizován, a nechybí ani stručný návod k jeho použití. U vybraných prvků jsou uvedeny také tipy pro efektivnější práci s programem.

### 6.2.1 Virtuální generátor napětíového signálu


Prvním a velmi důležitým krokem při realizaci programu bylo vytvoření virtuálního generátoru signálu. Byť tato část nebyla v zadání, pro splnění úkolu byla kvůli omezenému přístupu k měřicímu zařízení nezbytná. Skutečný měřicí systém byl proto při vývoji programu nahrazen virtuálním generátorem napětíového signálu. Pro realizaci bylo využito VI *Simulate Signal* a nástroj pro generování šumu. Výsledný signál je součtem těchto dvou složek (obr. 6.2).

Virtuální generátor se ovládá přes záložku *Virtual signal*. Aby bylo možné simulovat všechny reálné situace, je generátor opatřen nastavitelnou amplitudou stejnosměrného napětí (*Amplitude*) v rozsahu 0 až 10 V a nastavitelnou amplitudou náhodného šumu (*Noise*). Generovat lze také harmonický sinusový signál, například pro simulaci rušení napájecí sítě 50 Hz. U harmonické složky lze nastavit amplitudu (*Amplitude*), frekvenci (*Frequency*) i fázi (*Phase*). Při změně fáze je vždy nutné signál resetovat příslušným tlačítkem.



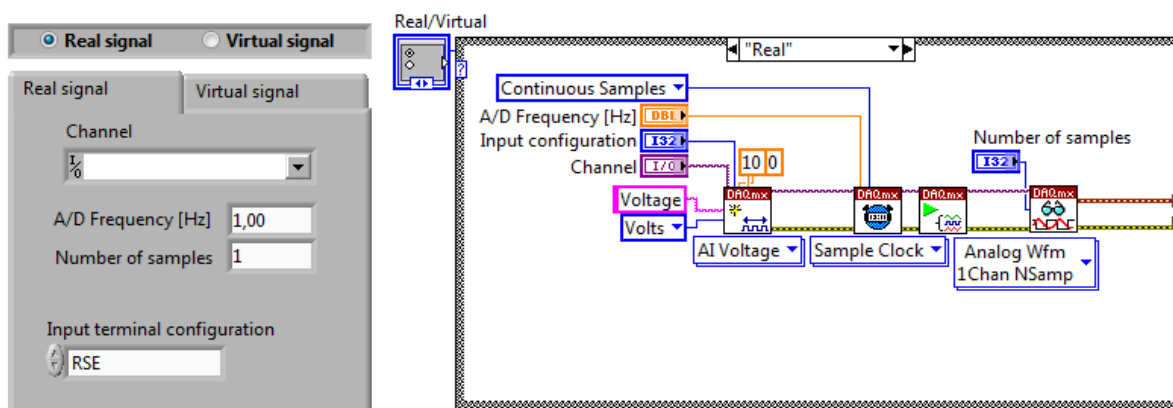
**Obr. 6.2)** Virtuální generátor napětí (vlevo) a příslušný blokový diagram (vpravo)

## 6.2.2 Získávání dat pomocí DAQ karty USB-6008

Pro sběr dat se v programu LabVIEW obvykle používá VI s označením *DAQ Assistant*. Tento nástroj umožňuje komunikaci programu a hardwaru (zde karty USB-6008) dle nastavených paramentů. Nevýhodou je, že některé parametry *DAQ Assistant* nelze měnit z čelního panelu (např. měřicí kanál, ze kterého se bude napětí odečítat). Tyto parametry lze upravit pouze přes blokový diagram v nastavení *DAQ Assistant*. Za účelem eliminovat tento nedostatek je získávání dat řešeno složitějším řetězcem elementů DAQmx (obr. 6.3) Prvky slouží pro komunikaci s kartou, rozpoznání signálu, ovládání rychlosti vzorkování a čtení signálu v LabVIEW. Díky tomu je možné velmi rychle měnit měřicí kanály i vzorkovací frekvenci přímo z čelního panelu. Změny se ovšem projeví až po restartování programu (symbol  v horní liště programu).

V čelním panelu si uživatel navolí kanál pro snímání (*Channel*), vzorkovací frekvenci převodníku (*A/D Frequency*) i požadovaný počet vzorků, které vstupují do jednoho cyklu programu (*Number of samples*). Snímání je kontinuální a probíhá následovně: program vyčká na nasnímání zadaného počtu vzorků danou vzorkovací frekvencí a následně provede jeden výpočetní cyklus. Po dokončení výpočtů se proces opakuje. Z výše uvedeného vyplývá, že rychlost odezvy programu závisí na vzájemném vztahu vzorkovací frekvence a počtu vzorků. Jsou-li obě hodnoty stejné, provede program 1 cyklus za sekundu. Je-li frekvence desetkrát vyšší než počet vzorků, provede se výpočet desetkrát za sekundu atd. Aby nedošlo k přetížení programu nevhodnou volbou parametrů, tak prodleva mezi cykly musí být minimálně 50 ms (max 20 cyklů za sekundu). Rychlejší snímání je vzhledem k určení programu nepravděpodobné, nicméně v případě potřeby lze prodlevu mezi cykly změnit v blokovém diagramu (VI „Wait“ se symbolem stopek).

U frekvence i počtu vzorků za sekundu lze zvolit libovolnou hodnotu v rozsahu 1 až 1000. Při výběru kanálu je dobré myslet na to, že LabVIEW automaticky čísluje od nuly (první kanál je označen nulou, stejně jako první řádek/sloupec tabulky či matice). Při reálném měření (záložka *Real signal*) je virtuální generátor neaktivní a obráceně.



**Obr. 6.3** Panel pro nastavení parametrů sběru dat (vlevo) a příslušný blokový diagram (vpravo)



### 6.2.3 Převod měřeného signálu na teplotu

Primární funkcí programu je převod vstupního signálu na teplotu. Vychází se zde z charakteristik použitého měřicího převodníku, který převádí teplotu v rozsahu 0 až 200 °C na napětí 0 až 10 V. Převodní charakteristika je lineární, což umožňuje použít následující rovnici:

$$t = 20 * U \quad (6.1)$$

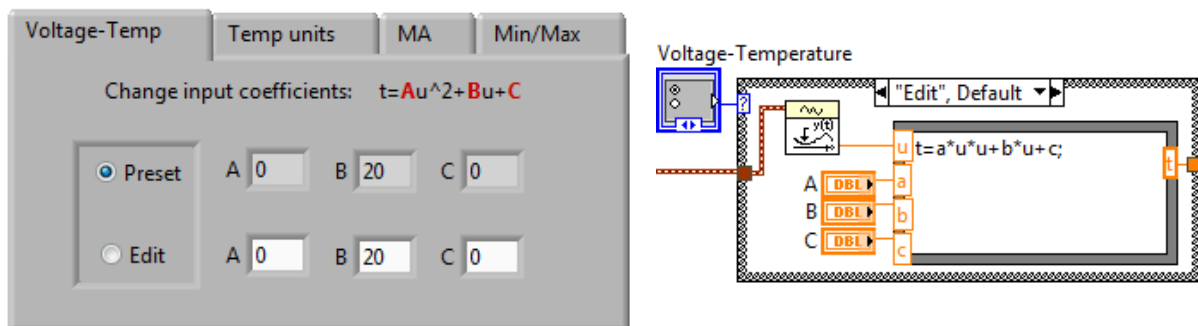
*kde:*  $t = \text{teplota } [^{\circ}\text{C}]$   
 $U = \text{napětí } [\text{V}]$

Zatímco výstupní rozsah (0 až 10 V) měřicích převodníků pro PT100 se zdá být standardem (viz tabulka 5.2), vstupní rozsah měřitelných teplot bývá odlišný. Je tedy evidentní, že měřicí převodníky pro PT100 využívají odlišné převodní rovnice. Tato skutečnost byla při vytváření programu zohledněna, a proto lze koeficienty převodního vztahu (rovnice 6.2) přímo z čelního panelu změnit. K měření lze tedy použít i jiné měřicí zesilovače s napěťovým výstupem. Pokud bychom chtěli použít měřicí zesilovač s proudovým výstupem, pak by bylo nutné změnit parametry u vstupního členu řetězce pro sběr dat (podkapitola 6.2.2).

$$t = A * u^2 + B * u + C \quad (6.2)$$

*kde:*  $A, B, C = \text{koeficienty rovnice}$

Změna koeficientů převodní rovnice má ale ještě jednu významnou funkci. Přednastavená rovnice (rovnice 6.1) má význam pouze za předpokladu, že prvky měřicího systému fungují přesně dle parametrů výrobce. Změnou koeficientů rovnice ovšem můžeme kompenzovat chyby offsetu (koeficient C) nebo chyby linearity (koeficient A) pro případ, že použijeme jednoduchý zesilovač bez linearizace (viz podkapitola o linearizaci). Zásahem do blokového diagramu by bylo možné změnit celou rovnici a přidat nebo odebrat vstupy na čelním panelu.

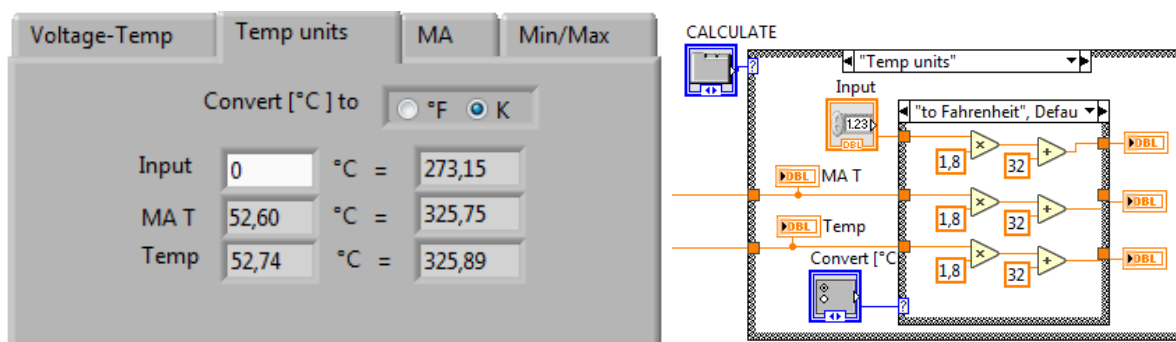


**Obr. 6.4)** Nastavení koeficientů rovnice pro převod měřeného napětí na teplotu. Čelní panel (vlevo) a blokový diagram (vpravo)

## 6.2.4 Převodník jednotek teploty

Program automaticky převádí měřené napětí [V] na celsiovu teplotu [°C]. Jednoduchou úpravou je možné podle vzorců v tabulce 2.1 převést celsiovu teplotu na libovolnou alternativní jednotku. Na tomto principu funguje jedna z doplňkových funkcí programu v podobě jednoduchého převodníku (*Temp units*). Nástroj umožňuje rychlý přepoččet celsiovu teploty na stupně Fahrenheita nebo Kelvina. Změnou jednotek nedojde ke změně v celém programu, ale pouze v příslušném okně.

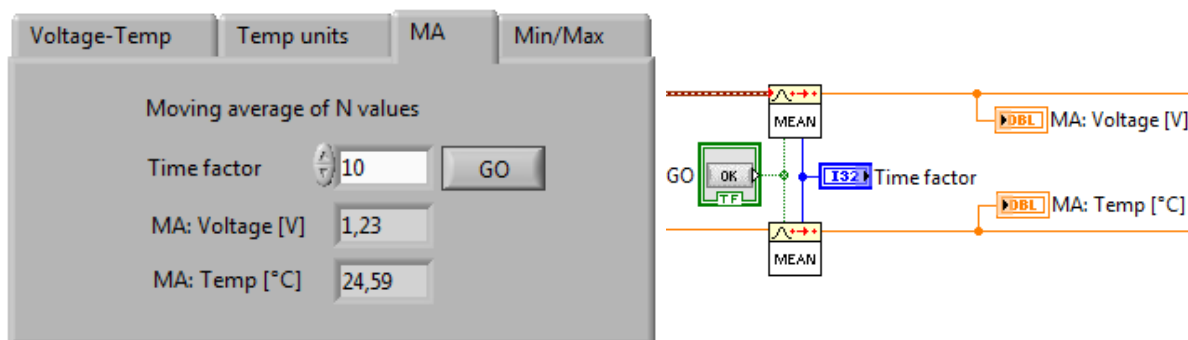
Převodník konvertuje základní parametry teploty (klouzavý průměr a aktuální hodnota), popřípadě hodnoty zadané obsluhou programu. Převodník je aktivní pouze ve chvíli, kdy je záložka *Temp units* otevřená.



Obr. 6.5) Převodník jednotek teploty. Čelní panel (vlevo) a blokový diagram (vpravo).

## 6.2.5 Klouzavý průměr

Princip a využití klouzavého průměru jsou popsány v podkapitole 4.2.6. Ve vytvořeném programu je klouzavý průměr označený zkratkou *MA* (z anglického Moving average) a je fixní složkou základního grafu (křivka modré barvy). Uživatel má možnost měnit časový rámec (*Time factor*), který ovlivňuje rozsah klouzavého průměru. Zadávaná hodnota značí, z kolika výpočtových cyklů se klouzavý průměr určí. Čím více vzorků do klouzavého průměru zahrneme, tím více se zvyšují nároky na výpočetní paměť, ale především dochází k výraznému zkreslení původní křivky. Cílem tohoto nástroje je ovšem pouze potlačit nežádoucí fluktuaci signálu. Proto lze volit časový rámec klouzavého průměru v omezeném rozsahu 2 až 100 cyklů. Doba cyklu závisí na parametrech sběru dat (viz podkapitola 6.2.2)



Obr. 6.6) Nastavení a indikátory pro klouzavý průměr. Čelní panel (vlevo) a blokový diagram (vpravo)

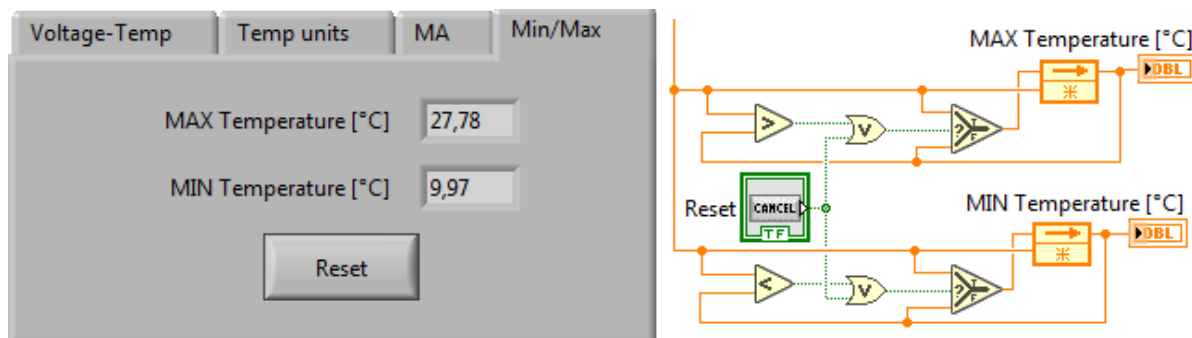


Při každé změně parametru *Time factor* je nutné stisknout tlačítko *GO*, kterým se klouzavý průměr resetuje a začne se počítat znovu. Z toho také plyne, že pro prvních *X* cyklů (kde *X* je hodnota *Time factor*) jsou výsledky po restartování zkreslené. V záložce *MA* jsou dále umístěny indikátory pro klouzavý průměr měřeného napětí a aktuální teploty. V blokovém diagramu je klouzavý průměr teploty i napětí realizován pomocí dvojice VI „*MEAN*“ pro určení aritmetického průměru (obr. 6.6).

### 6.2.6 Určení minima a maxima měřených teplot

Další doplňkovou funkcí programu je určení minimální a maximální teploty při měření. V čelním panelu je tato funkce skryta pod záložkou *Min/Max*. Hodnoty se zobrazují pomocí dvou numerických indikátorů a záložka je doplněna o tlačítko *Reset*, kterým lze hodnoty uložené ve virtuálním komparátoru smazat a restartovat tak celý proces hledání limitních hodnot.

V blokovém diagramu je tato funkce řešena pomocí dvou logických okruhů. V nich se první vstupní hodnota ukládá do paměti a následně se porovnává s dalšími příchozími hodnotami teploty. Pokud je vstupní hodnota menší (respektive větší) než uložená hodnota, dojde k přepsání hodnoty a k jejímu zobrazení na čelním panelu. Oba okruhy jsou napojeny na jeden ovládací prvek, jehož aktivací dojde k přepsání uložené hodnoty aktuální hodnotou signálu.



**Obr. 6.7)** Určení minimální a maximální teploty při měření. Čelní panel (vlevo) a blokový diagram (vpravo)

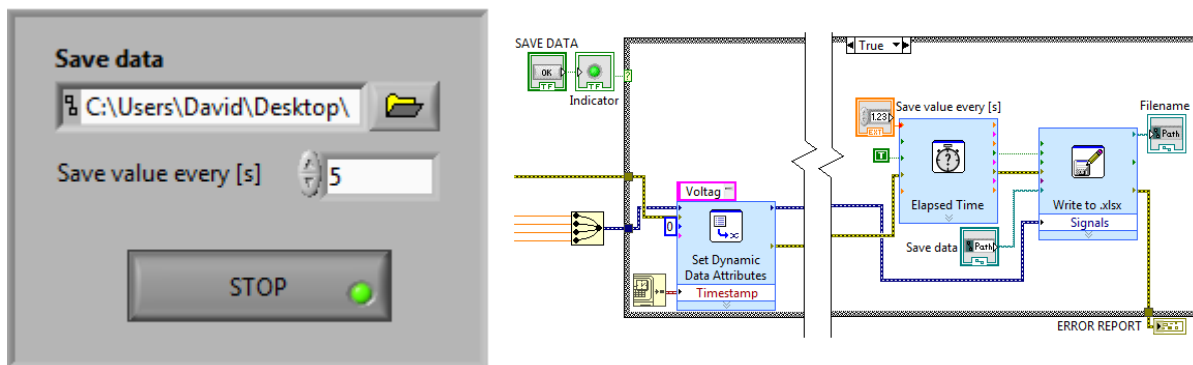
### 6.2.7 Ukládání dat ve formátu .xlsx (Excel)

Jedním z požadavků bylo, aby program umožnil ukládání naměřených dat ve formátu *xlsx* (MS Excel). K tomuto účelu lze využít integrovaný VI „*Write to*“. S přihlédnutím k praktickému využití je ukládání rozšířeno o možnost nastavení libovolného intervalu mezi ukládanými vzorky. Této funkce bylo dosaženo pomocí VI „*Elapsed Time*“. Uživatel si jinými slovy zvolí časový interval (v sekundách) mezi uložením dvou po sobě jdoucích hodnot. Nastavit lze hodnoty v rozsahu 0,2 (uložení 5 vzorků za sekundu) až 3600 sekund (1 vzorek za hodinu).

Data se neukládají automaticky, ale až po aktivaci příslušným tlačítkem (*START* s indikační diodou). Stisknutím téhož tlačítka lze záznam vzorků přerušit a opětovně spustit. Kliknutím na ikonu složky si uživatel vybere soubor ve formátu *xlsx*, do kterého chce data

ukládat. Před ukládáním se musí uživatel ujistit, že zadal platnou cílovou cestu. Adresář nad tlačítkem START ukazuje umístění souboru, do kterého se data aktuálně ukládají.

Do souboru se ukládá vždy čas zaznamenání vzorku a čtyři základní hodnoty: měřené napětí, odpovídající teplota, klouzavý průměr napětí a klouzavý průměr teploty. V blokovém diagramu byl také každému ze signálů přiřazen název pomocí VI „Set Dynamic Data Attributes“.



**Obr. 6.8)** Ukládání souboru do formátu excel. Čelní panel (vlevo) a blokový diagram (vpravo)

The figure shows a screenshot of an Excel spreadsheet titled 'PT100\_03 - Excel'. The spreadsheet contains a table of recorded data with the following columns: Time, Voltage [V], Voltage moving average [V], Temperature [°C], and Temperature moving average [°C]. The data is recorded from 16.4.2019 09:56:58 to 16.4.2019 09:57:14. The table is as follows:

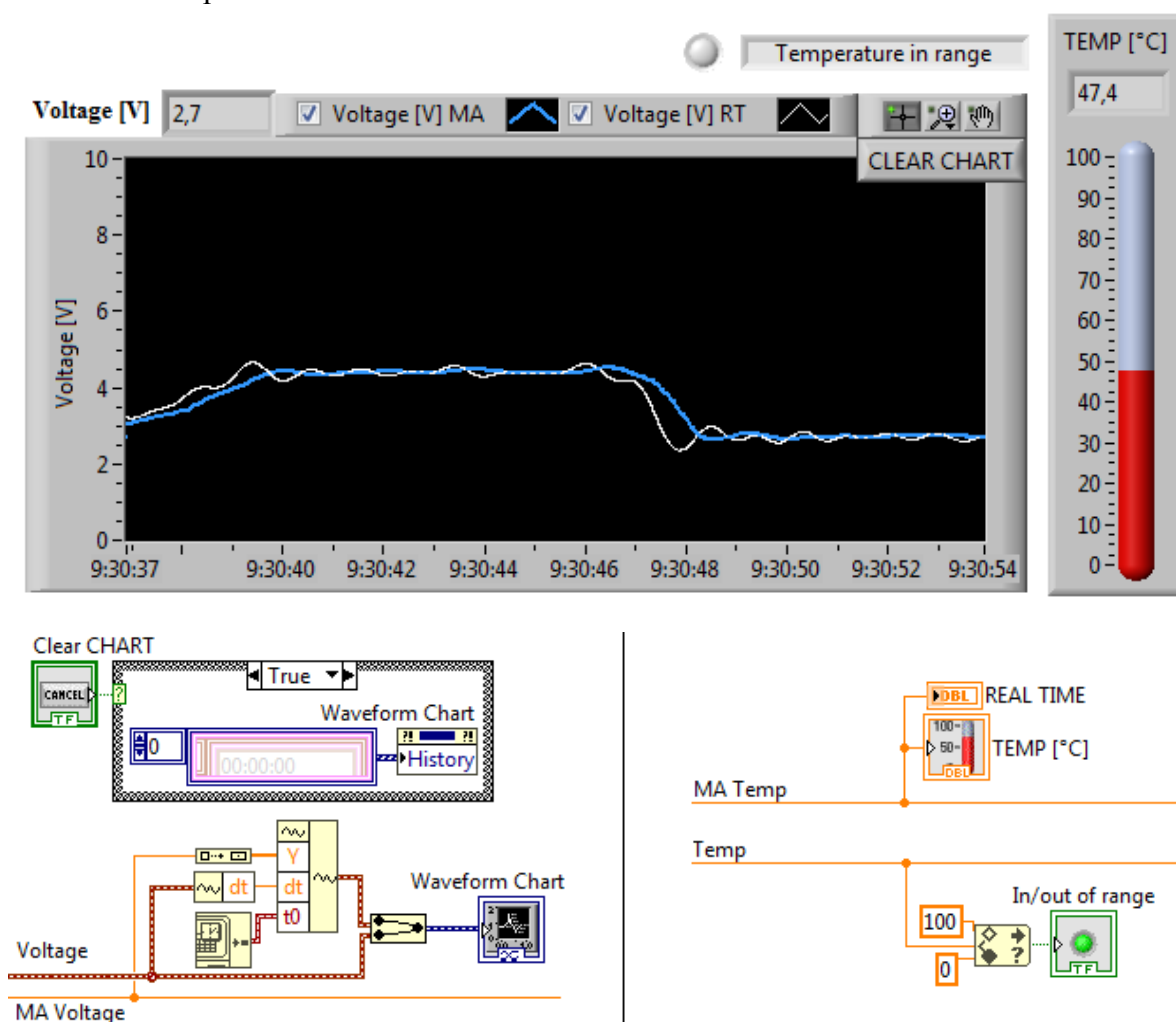
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Time	Voltage [V]	Voltage moving average [V]	Temperature [°C]	Temperature moving average [°C]				
2	16.4.2019 09:56:58	2,20044	0,89156	16,446035	17,843695				
3	16.4.2019 09:56:59	0,876883	0,867913	30,582219	17,360512				
4	16.4.2019 09:57:00	1,200132	0,62919	0,781033	12,593145				
5	16.4.2019 09:57:01	0,653205	0,991343	7,641737	19,833265				
6	16.4.2019 09:57:03	1,326537	0,568973	14,633414	11,382967				
7	16.4.2019 09:57:04	1,764764	0,535846	6,329652	10,73183				
8	16.4.2019 09:57:06	1,853045	0,792871	27,193604	15,86046				
9	16.4.2019 09:57:08	1,528793	0,823888	32,479181	16,484868				
10	16.4.2019 09:57:11	2,50684	0,974358	10,125744	19,480458				
11	16.4.2019 09:57:14	1,571677	0,788234	-3,030583	15,776074				
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									

**Obr. 6.9)** Ukázka uloženého souboru

## 6.2.8 Grafické a numerické výstupy

Součástí čelního panelu je několik grafických a numerických indikátorů, které zobrazují měřené hodnoty napětí a aktuální teplotu. V záložce *Live measuring* je velký graf pro zobrazení napětí (snímané vzorky a klouzavý průměr). Data z grafu lze vymazat pomocí tlačítka *CLEAR CHART* v pravém horním rohu. Nad tímto tlačítkem jsou základní nástroje pro orientaci v grafu (kurzor, lupa, posouvání). Kliknutím na pravé tlačítko myši do oblasti svislé nebo vodorovné osy lze aktivovat nebo deaktivovat funkci autoscale, která upravuje rozsah os podle měřených dat. Dvojklikem na krajní hodnotu osy lze rozsah upravit manuálně.

Poslední naměřená hodnota napětí se vypisuje numericky nad graf (*Voltage*). Aktuální teplota se zobrazuje v samostatném panelu vedle hlavního okna. Kromě numerického indikátoru je součástí programu také virtuální teploměr s rozsahem 0 až 100 °C. Virtuální teploměr nelze minimalizovat ani deaktivovat a je nedílnou součástí uživatelského rozhraní. I při analyzování dat (tj. při práci v jiném okně) má tedy obsluha programu přehled o aktuální snímané teplotě.



**Obr. 6.10)** Grafické a numerické výstupy měření. Čelní panel (nahore) a příslušné prvky v blokovém diagramu (dole)

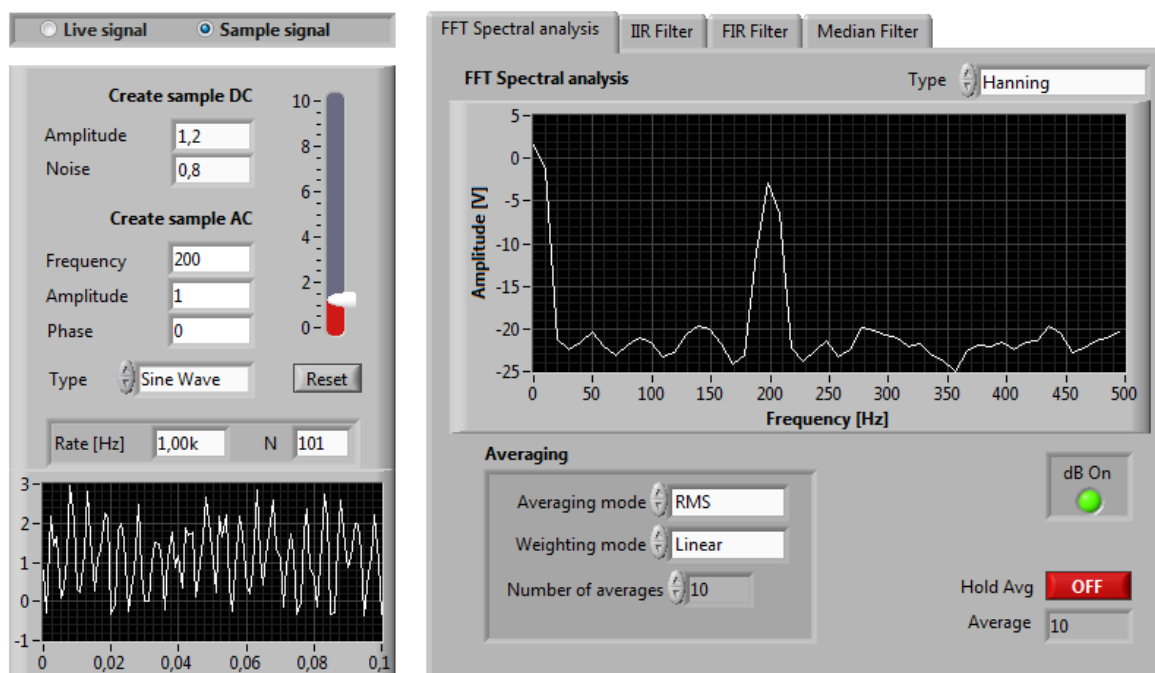
## 6.2.9 Číslicové filtry

Jedním z hlavních požadavků na program bylo číslicové filtrování signálu. Program proto nabízí čtyři druhy číslicových filtrů. Kromě výše uvedeného klouzavého průměru, který se aplikuje automaticky, lze spustit filtr typu *FIR*, *IIR* nebo mediánový filtr (*Med*). Filtr se spouští (popřípadě zastavuje) pomocí tlačítka *ENABLE FILTER* v pravém horním rohu čelního panelu. Pod tímto tlačítkem si uživatel vybere požadovaný typ filtru. Další nastavení je možné v záložce *Numeric Filtering*.

Filtrování lze aplikovat na měřený signál (ať už pochází z DAQ karty nebo z virtuálního generátoru), ale také na vzorek signálu, který si uživatel může vytvořit. Tato funkce je zahrnuta proto, aby bylo možné experimentálně optimalizovat parametry filtru. Uživatel může sledovat odezvu filtru na různé parametry vstupů a najít ideální nastavení filtru pro různé operace. Filtrování nelze aplikovat na měřený signálem (*Live signal*) a generovaný vzorek signálu (*Sample Signal*) současně. Proto musí uživatel v případě potřeby změnit zdroj filtrovaného signálu (záložka *Numeric Filtering*).

Po spuštění filtru se automaticky provádí spektrální analýza za účelem odhalit frekvence harmonických složek v signálu. Spektrální analýza se provádí metodou FFT, přičemž příslušný ovládací panel je v záložce *Numeric filtering* → *FFT Spectral analysis*. V této záložce je graf frekvenčního spektra. Pro lepší zvýraznění frekvenčního spektra je možné zprůměrovat několik vzorků (*Averaging*), popřípadě použít utlumení/zesílení signálu pomocí výkonového spektra (*dB ON*).

Teorie FIR a IIR filtrů je probrána v podkapitole 4.2.4 Filtrace signálu. Co tato kapitola nezmiňuje, to je mediánový filtr, který je součástí programu. Mediánový filtr je jednoduchý numerický filtr, který funguje obdobně jako klouzavý průměr. Nevyužívá ovšem dynamicky se měnící aritmetický průměr, ale medián. V nastavení tohoto filtru jsou pouze dva

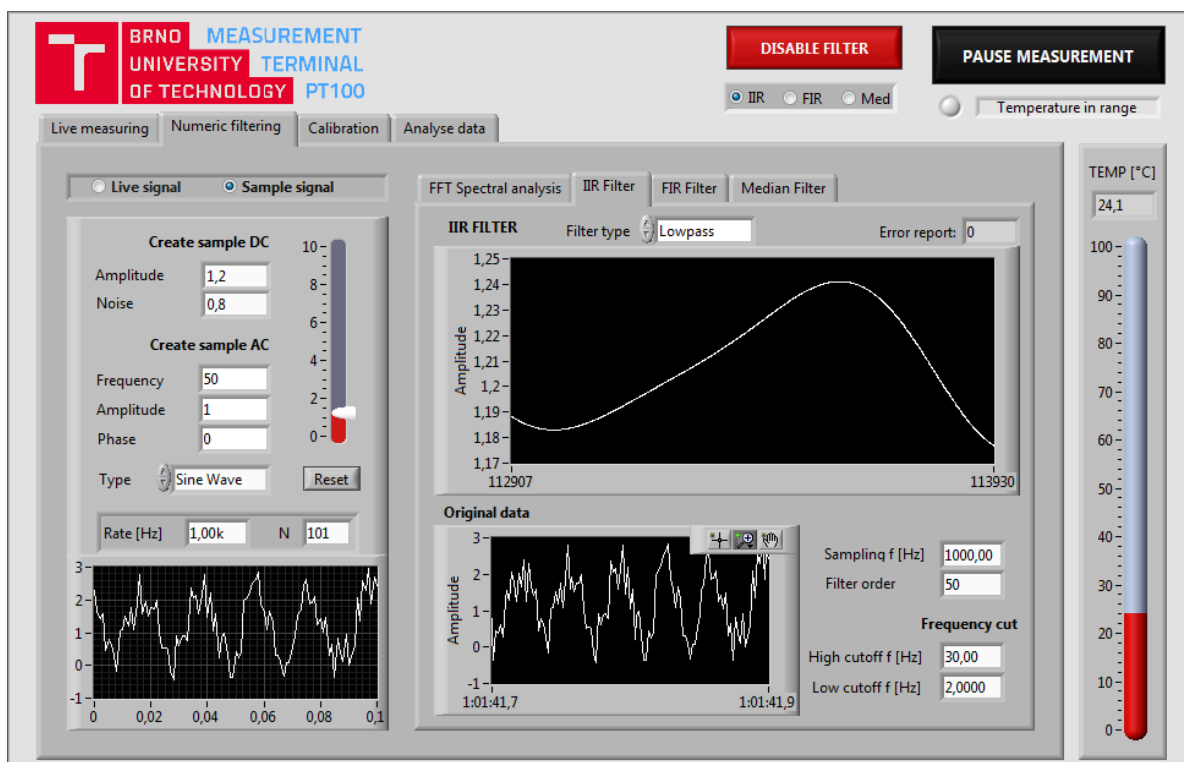


**Obr. 6.11)** Okno pro spektrální analýzu (vpravo) a generátor pro vzorek signálu (vlevo).

parametry: počet vzorků zahrnutých do výpočtu z levé a pravé strany (*left rank* a *right rank*). Hledáme-li filtrovanou hodnotu  $X$ , pak levý (resp. pravý) řád značí počet vzorků před (respektive za)  $X$ , které byly do výpočtu zahrnuty. Záporná hodnota u pravého řádu se chová jako levý řád. Kladná hodnota se pro živé měření nepoužívá, protože vzorky za aktuální hodnotou neexistují. Tento filtr je součástí programu spíše jako ukázka alternativních filtrů. Při testování se navíc ukázalo, že pro danou úlohu není filtr účinný a má vysoké zkreslení.

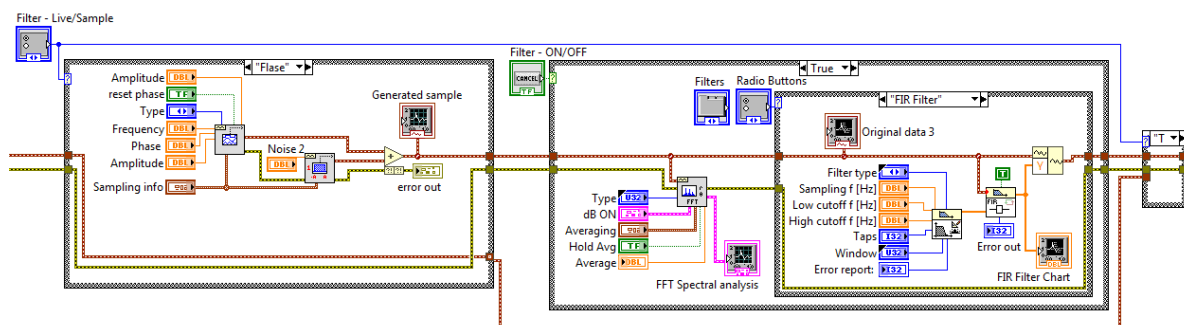
U filtrů typu FIR a IIR lze nad hlavním grafem měnit typ filtru (LPF, HPF, BPF, BSF). Pro měření s PT100 je logickou volbou LPF (dolní propust), který je také nastaven jako výchozí filtr. Ze spektrální analýzy je totiž patrné, že stejnosměrný signál se chová jako harmonický signál s nulovou frekvencí (obrázek 6.11). V této oblasti tedy potřebujeme zachovat amplitudu a zabránit nežádoucímu útlumu, což bylo zohledněno také při tvorbě filtru se zpětnou vazbou. Z dostupných aproximací byla proto pro IIR filtr zvolena aproximace Butterworth, která sice nemá strmé utlumení, ale má hladký průběh a prakticky nulové zvlnění v propustné oblasti (viz obrázek 4.8).

V záložce *FIR Filter* lze měnit základní parametry. Vzorkovací frekvence filtru se nastavuje pomocí *Sampling f* a musí být větší než nula. Filtr využívá metodu váhové posloupnosti, takže nechybí ani možnost měnit typ vyhlazovacího okna (*Window*), které má snížit vlnění v propustné části filtru. Pásmo propustnosti se nastavují pomocí limitních frekvencí: *low cutoff f* je dolní frekvence u BSF a BPF a limitní frekvence pro LPF a HPF. *High cutoff f* je horní frekvence BSF a BPF. Pro filtry typu LPF a HPF program tento parametr ignoruje. Hodnota *Taps* značí délku filtru (počet koeficientů rovnice neboli řád filtru minus 1). U Filtru typu IIR jsou parametry téměř stejné. Pouze pole *Taps* je nahrazeno polem *Filter order* pro stanovení řádu filtru.



Obr. 6.12) Okno pro nastavení filtrů.

V blokovém diagramu jsou filtry uloženy do vlastní *case* struktury, takže deaktivace filtrování znamená úplné vypnutí filtrů, aby se zbytečně nezatěžoval počítač. Z téhož důvodu nelze spustit více filtrů současně. Filtry jsou realizované pomocí VI *FFT Spectrum (Mag-Phase)*, *FIR windowed coefficients*, *FIR Filter*, *Median Filter* a *Butterworth Filter*. Filtrovaný signál je složen pomocí VI *Build Waveform* přepsáním Y složky v původním signálu.

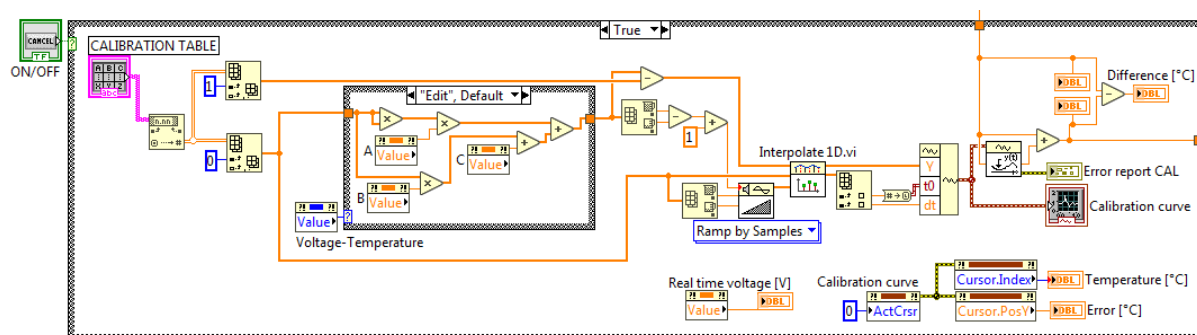


**Obr. 6.13)** Blokový diagram pro filtry, spektrální analýzu a generátor vzorku signálu.

### 6.2.10 Funkce rychlé kalibrace hodnot

Při kalibraci odporových teplotních senzorů lze využít korekční tabulky. Jak kalibrace probíhá a jak se vyhodnocuje je uvedeno v kapitole 7. Program umožňuje zadávat hodnoty z kalibrace do tabulky a na základě těchto hodnot se signál v reálném čase upravuje. Smyslem tohoto nástroje je tedy umožnit korekci nepřesností měřicího systému.

Blokový diagram této funkce je poměrně komplikovaný, protože LabVIEW nenabízí žádný VI pro tento typ operací. Hodnoty z korekční tabulky se nejprve převádí do číselného formátu. Uživatel do tabulky zadává vždy dvojice hodnot: ideální napětí při referenční teplotě a reálnou (naměřenou) teplotu. Těchto dvojic lze vyplnit libovolné množství. Program musí nejprve vyhodnotit, jaká by měla být při uvedeném napětí teplota dle převodního vztahu. Převodní vztah program čerpá ze záložky *Voltage-Temp*, která byla popsána dříve. Korekční tabulka díky tomu funguje nejen pro přednastavenou převodní rovnici, ale i pro rovnici s vlastními koeficienty. Následně program určuje rozdíl mezi ideální a naměřenou hodnotou a ten vynese do grafu. Body v grafu se lineárně interpolují a vytvoří inverzní kalibrační křivku. Tato křivka ukazuje, jak se mění velikost odchylky ideální a skutečné teploty

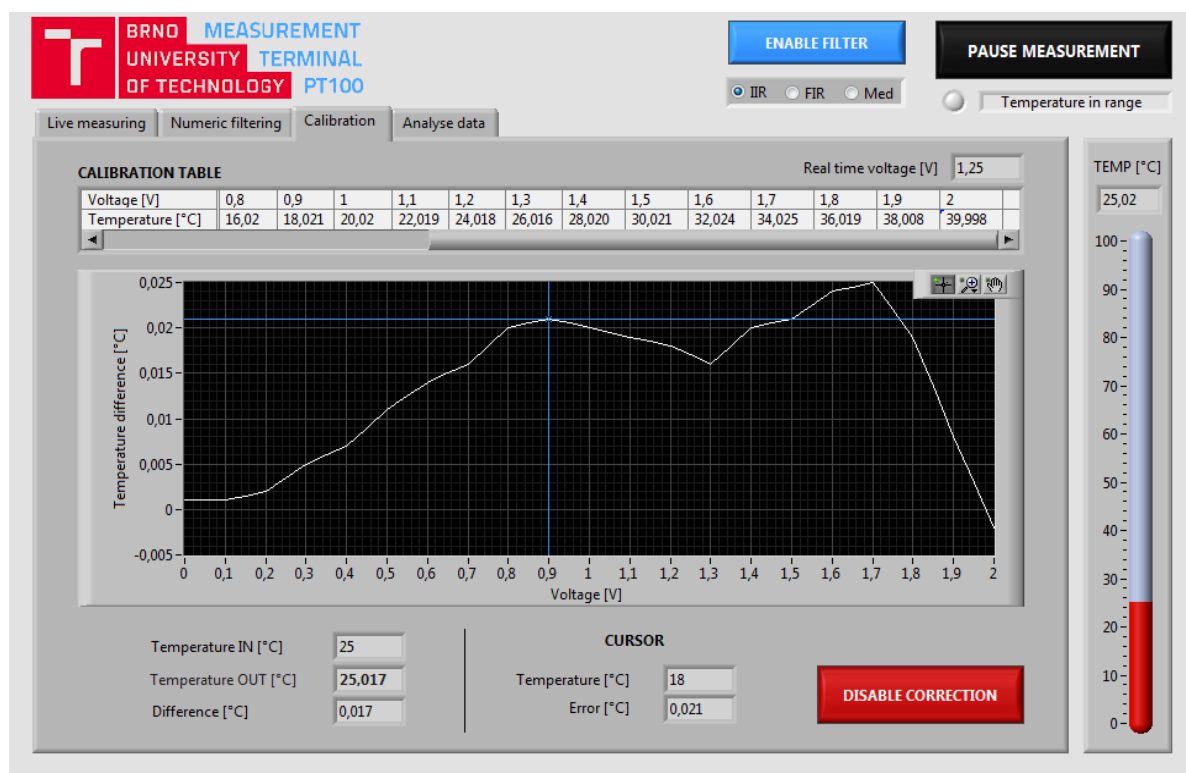


**Obr. 6.14)** Blokový diagram kalibrační funkce



v závislosti na napětí (respektive teplotě). Každá vstupující hodnota napětí se následně používá jako X souřadnice pro určení odchylky (Y souřadnice) z vytvořené křivky. Tato odchylka se přičte k dané teplotě, čímž dojde ke korekci. V blokovém diagramu je funkce pro kalibraci ve vlastní *case* struktuře a lze ji aktivovat nebo deaktivovat příslušným tlačítkem (*ENABLE/DISABLE CORRECTION*).

Na čelním panelu je kromě tabulky a grafu s korekční křivkou také několik numerických indikátorů. Ty ukazují teplotu před korekcí (*Temperature IN*), teplotu po korekci (*Temperature OUT*) a vzájemný rozdíl těchto hodnot (*Difference*). Korekce se aktivuje tlačítkem v pravém dolním okraji v záložce *Calibration*. Správnost korekce si může uživatel ověřit pomocí posuvného kurzoru v grafu korekční křivky. Posunutím kurzoru se zobrazí teplota pro dané napětí dle převodního vztahu (*Temperature*) a očekávaná odchylka, která se k této teplotě musí přičíst (*Error*).



**Obr. 6.15)** Čelní panel nástroje pro korekci teploty

Na obrázku výše lze vidět možnost pozastavit měření (černé tlačítko v pravém horním okraji). Přerušením se pozastaví veškeré výpočty související se sběrem dat a lze jej použít například při offline analýze (viz následující podkapitola). Opětovné spuštění programu stejným tlačítkem ovšem způsobuje jedinou odhalenou chybu, která má vliv na správnou funkci programu. Data se v takovém případě začnou zapisovat od momentu přerušení, čímž se naruší časový průběh křivky. Tento nedostatek se nepodařilo odstranit, takže místo přerušení a opětovného spuštění je lepší program restartovat. Ostatní odhalené chyby vznikají zadáním chybných parametrů nebo nesprávnou obsluhou programu a lze je snadno napravit (např. zadáním platných parametrů).

### 6.2.11 Nástroje pro analýzu dat

Záložka pro analyzování dat (*Analyse data*) slouží k práci s naměřenými daty. Součástí zadání je totiž požadavek, aby program umožňoval práci v ONLINE (živá data) i OFFLINE (data z předchozích měření) režimu. *Analyse data* tedy nepracuje s živými daty, které se zobrazují v záložce *Live measuring*, ale s daty, které uživatel importuje. Analýza dat probíhá nezávisle na měření signálu a obě činnosti mohou probíhat současně.

Záložka *Analyse data* je tvořena dvěma grafy, panelem pro importování souboru a panelem nástrojů (obrázek 6.16). Program rozpozná soubory ve formátu txt tab-delimited. Data z měření se ovšem dle požadavku ukládají ve formátu xlsx, takže je potřeba soubor konvertovat. Jedná se ovšem o jednoduchý úkon, protože stačí otevřít původní soubor v programu MS Excel a uložit jej jako soubor typu *Text (Tab delimited)*.

Soubory v požadovaném formátu uživatel vybere kliknutím na ikonu složky. Vybraný soubor se načte po stisknutí tlačítka *RELOAD*. Od tohoto okamžiku začíná program analyzovat vybraná data a pokud se uživatel rozhodne načíst nový soubor, musí nejprve analýzu ukončit tlačítkem *STOP*. Pokud uživatel nahraje nový soubor bez ukončení analýzy, program jej k tomuto kroku automaticky vyzve.

Po nahrání souboru si uživatel vybere sloupec s daty, který chce do grafu vykreslit (*Select culomn*). V souborech ukládaných tímto programem se například zapisují čtyři různé parametry, každý do vlastního sloupce (obr. 6.9). Změnou sloupce lze tedy analyzovat libovolný z těchto parametrů. Nevýhodou je, že LabVIEW u importovaných souborů nerozpozná text ani datovou známku (pouze čísla), takže se na osu X místo času vypisuje číslo vzorku.



**Obr. 6.16** Záložka pro analýzu off-line dat (*Analyse data*) během analýzy dat z kalibrace.



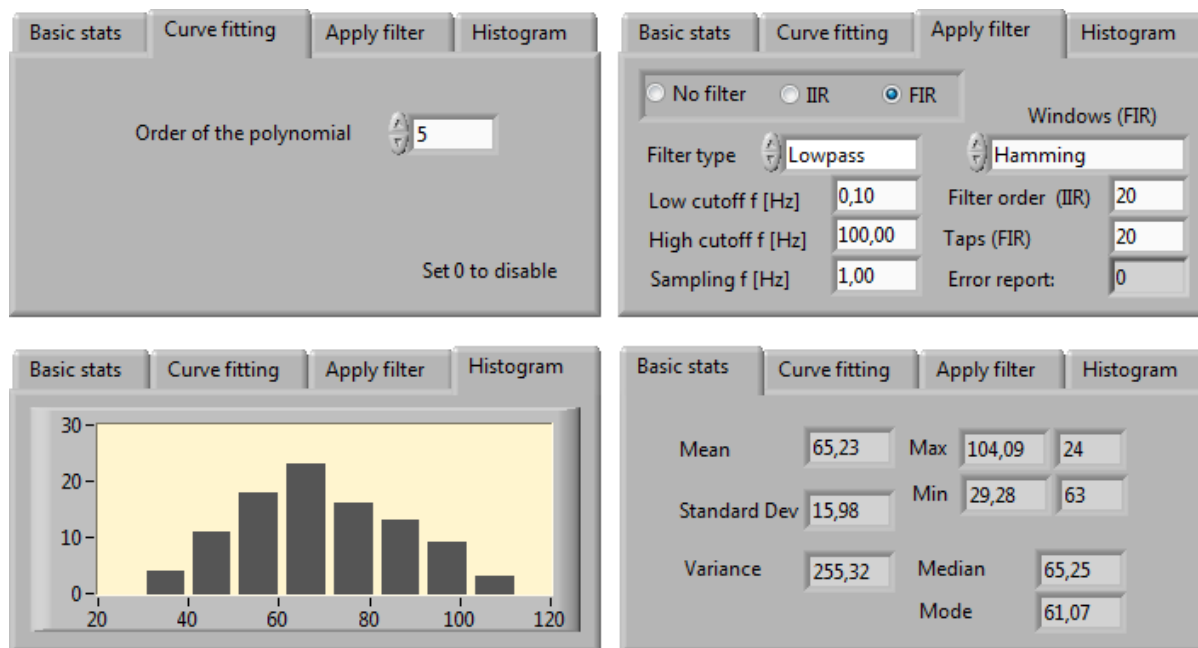
Větší graf v levé části pracovního okna zobrazuje všechna data z nahraného souboru (respektive všechna data z vybraného sloupce). Součástí grafu jsou dva svislé kurzory, kterými může uživatel programu pohybovat ve směru osy X. Úsek mezi těmito kurzory se zobrazuje v menším grafu vpravo. Na tomto úseku se pak automaticky provádí analýza základních statistických veličin: aritmetický průměr (*Mean*), výběrová směrodatná odchylka (*Standard Dev*), výběrový rozptyl (*Variance*), maximum a minimum (spolu s číslem vzorku), modus a medián. Naměřené hodnoty jsou v grafu zvýrazněny bílými body a počet vzorků ve zvoleném intervalu je uveden pod grafem (*Number of samples*).

Doplňkovou funkcí v záložce *Analyse data* je možnost proložit body na vybraném intervalu křivkou (záložka *Curve fitting*). Uživatel může zvolit polynom prvního až desátého řádu a křivka se vykreslí do grafu s vybranou oblastí. Pokud uživatel zadá jako řád polynomu symbol 0, aproximační křivka se z grafu odstraní. Dále lze vykreslit histogram naměřených hodnot (záložka *Histogram*). Počet tříd histogramu se automaticky upravuje podle počtu vzorků v zadaném intervalu tak, aby bylo splněno Sturgesovo pravidlo, které je definováno následujícím vztahem:

$$k = [1 + 3,32 * \log(n)] \quad (6.3)$$

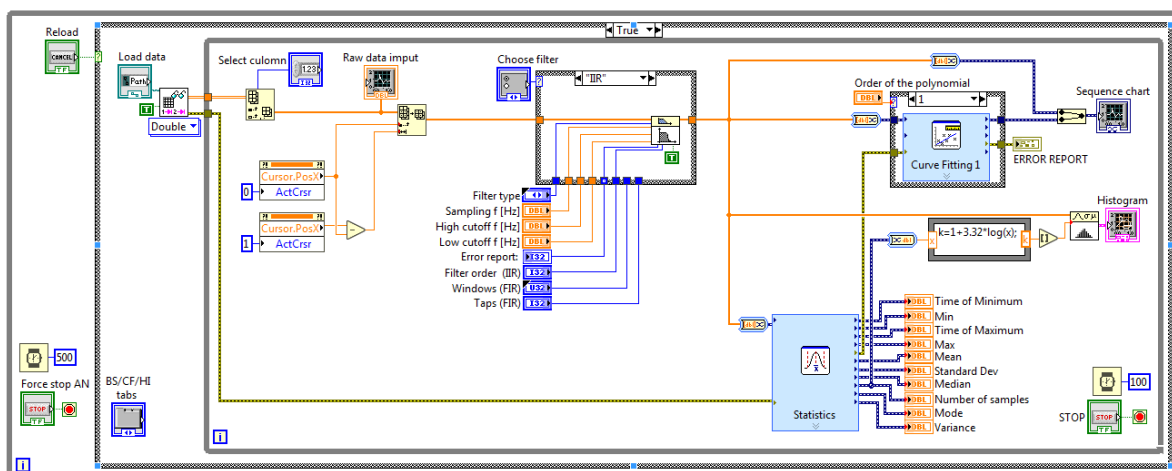
kde:  $k$  = počet tříd histogramu  
 $n$  = počet prvků zkoumaného souboru

Histogram může uživateli pomoci například při měření konstantní (např. kalibrace) nebo pomalu se měnící teploty. Soubor vzorků z takového měření by měl mít normální rozdělení a histogram by měl připomínat Gaussovu křivku. Poslední funkcí je možnost číslicového filtrování vzorků na vybraném intervalu (*Apply Filter*). Filtrování bylo blíže popsáno v podkapitole 6.2.9.



**Obr. 6.17)** Nástroje analýzy: Proložení křivkou, filtrování, histogram a základní statistika.

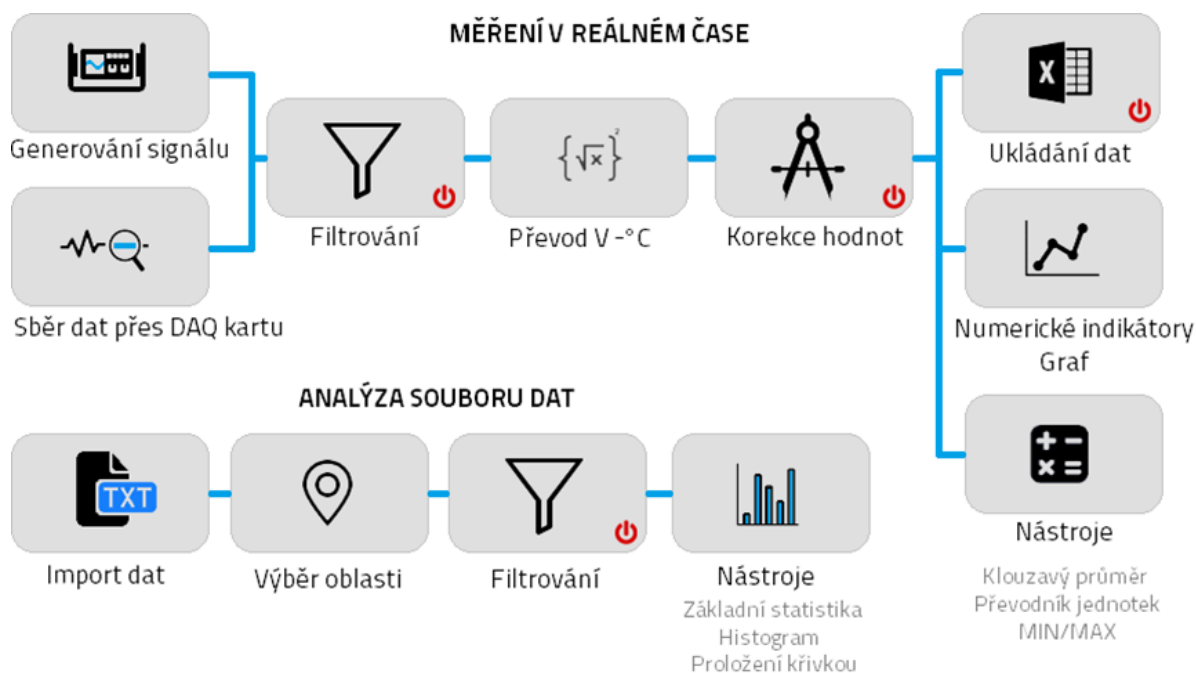
Kompletní blokový diagram okna *Analyse data* je zobrazen v příloze A. Pro výpočet statistických veličin byl použit integrovaný VI *Statistic* a pro proložení polynorem VI *Curve Fitting*.



**Obr. 6.18)** Blokový diagram záložky *Analyse data* tvoří vlastní nezávislý cyklus

### 6.3 Celkový přehled programu

Aby uživatelské okno nebylo příliš velké, je celý program rozdělen do čtyř záložek. Hlavní záložka *Live measuring* slouží pro obsluhu měřicího zařízení a kontrolu měřených hodnot. Okno *Numeric Filtering* slouží k nastavení filtrů a v záložce *Calibration* najde uživatel nástroje pro korekci hodnot pomocí kalibrační tabulky. Poslední záložka *Analyse data* je určena pro analýzu off-line dat. Nad pracovním oknem je velké tlačítko *START MEASUREMENT* pro zahájení a pozastavení sběru dat. Pod tlačítkem je indikační dioda, která se rozsvítí červenou barvou v případě, že hodnota teploty opustí požadované pásmo (0 až 100 °C).



**Obr. 6.19)** Schéma struktury vytvořeného programu

Ve vybraných záložkách je v pravém dolním rohu panel pro zobrazení chybových hlášení (*ERROR REPORT*). Tento prvek umožňuje, aby program fungoval i v případě, že nastane chyba na některém z použitých VI. Typickou situací je například vložení neplatných vstupních hodnot nebo sběr reálných dat bez zapojeného DAQ zařízení. Program se při chybě neukončí, ale pouze vypíše chybové hlášení do okna *source* a označí chybu do pole *code*. Pod panelem je tlačítko *FORCE STOP*, které okamžitě ukončí všechny procesy dané záložky. Stisknutím tohoto tlačítka se ukončí veškeré probíhající cykly a program přestane pracovat. K opětovnému spuštění je potřeba program restartovat. Tlačítko slouží pro případy nečekaných chyb, které by způsobily problémy s programem.

Po otevření je program přednastaven na reálný signál a měření je pozastaveno. Uživatel by měl v první řadě nastavit parametry DAQ karty, popřípadě parametry pro virtuální signál. Filtrování, korekce i ukládání dat je po spuštění neaktivní. Velikost vstupního (neupraveného) napětí se vypisuje nad graf v záložce *Live measuring*. V grafu se zobrazuje upravená hodnota (filtrování, korekce). Virtuální teploměr na pravém okraji pracovního okna ukazuje klouzavý průměr naměřené celsiovy teploty.

Kompletní blokový diagram programu je poměrně rozsáhlý a je součástí příloh. Jednotlivé prvky blokového diagramu by bylo možné převést do samostatných VI (např. podle schématu na obrázku 6.19), čímž by se blokový diagram výrazně zjednodušil. Aby ovšem bylo možné do blokového diagramu jednoduše zasahovat a provádět případné změny, tak byl ponechán v původní podobě.



**Obr. 6.20)** Vytvořený program (záložka *Live measuring* pro měření)

## 7 OVĚŘENÍ SPRÁVNOSTI FUNKCE MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ

Úvod následující kapitoly je věnován teorii chyb a nejistě měření. Z této teorie se dále vychází při návrhu a realizaci metody pro ověření měřicího zařízení.

Cílem každého měření je zjistit přesnou hodnotu měřené veličiny. Výsledek každého měření je ovšem zatížen chybou. A to i v případě, že byla použita kalibrovaná a ověřená měřidla. Během měření vznikají totiž tři typy chyb: [36]

**Hrubé chyby** vznikají nepozorností obsluhy, poruchou měřidla nebo použitím nevhodného postupu. Tento typ chyb je důležité odstranit. Jejich dopad na výsledky měření je zásadní a zpětná korekce neefektivní.

**Systematické chyby**, jejichž velikost se mění dle známé závislosti, vznikají vlivem nedokonalostí měřicího zařízení či nedostatků použité metody. Tento typ chyb je možné částečně eliminovat (např. korekcí). Velikost systematických chyb je při neměnných podmínkách měření konstantní.

**Náhodné chyby** nelze předvídat, protože vznikají náhodnými rušivými vlivy (např. změna tlaku či teploty okolí, otřesy atd.). Náhodnou chybu nelze zcela odstranit, ale opakovaným měřením lze velikost chyby odhadnout pomocí statistických metod.

Rozdíl mezi naměřenou hodnotou  $x_m$  a skutečnou hodnotou měřené veličiny  $x_s$  se označuje jako absolutní chyba. Problémem je, že při měření je přesná hodnota neznámá. Tuto hodnotu lze pouze s určitou pravděpodobností odhadnout, takže i výsledná chyba měření je pouhým odhadem. Poměr absolutní chyby k porovnávané hodnotě se označuje jako relativní chyba. Ta se obvykle uvádí v procentech.

Za účelem získat co nejpřesnější odhad se měření provádí vícekrát. Opakovaná měření se ovšem musí provádět za stejných podmínek (tlak, teplota, vlhkost, metoda, použité vybavení). Pokud má soubor naměřených hodnot normální pravděpodobnostní rozdělení, tak se odhad skutečné hodnoty měřené veličiny vypočítá jako aritmetický průměr naměřených hodnot (rovnice 4.4). [36]

Dle původu lze chyby dělit na instrumentální, metodické, teoretické a chyby způsobené zpracováním dat. Instrumentální chyby souvisí s nedokonalostí použitých zařízení, a k jejich potlačení se používají například korekční křivky. Chyby teoretické souvisí s použitými postupy a metodické chyby s realizací měření. Chyby způsobené zpracováním dat vznikají například nevhodným statistickým vyhodnocením atd.

## 7.1 Instrumentální chyby použitého měřicího zařízení

V teoretické části byly postupně popsány významné zdroje chyb odporových senzorů a způsoby, jak dopad chyb kompenzovat nebo minimalizovat. Na celkovou chybu měření nemá ovšem vliv pouze senzor. Při měření teploty musíme brát v úvahu i vlivy ostatních prvků teplo-měrného zařízení, zejména pak měřicího zesilovače a A/D převodníku. Mezi nejčastější zdroje chyb patří následující [1] [37] [38]:

### Pro měřicí senzory

- Odchylka od normované závislosti odporu na teplotě
- Chyba způsobená ohřátím senzoru vlivem excitačního proudu
- Chyba způsobená vlastního odporu vnitřního vedení snímače

### Pro měřicí zesilovače

- Frekvenční zkreslení signálu (je dáno útlumovou charakteristikou)
- Chyba linearity

### Pro A/D převodníky

- Kvantizační chyba (způsobeno konečným rozlišením převodníku)

### Společné chyby a chyby celého systému

- Chyba způsobená nestabilitou vlastností vlivem stárnutí
- Chyba způsobená změnou okolní teploty (drift)
- Chyba nuly (offsetu)
- Chyba kolísání zdroje proudu / napětí

Celková chyba měřicího zařízení se skládá z dílčích chyb. Při přesném měření je žádoucí tuto chybu kompenzovat, aby bylo dosaženo vysoké přesnosti a co nejnižší nejistoty měření. Vzhledem k velkému množství možných chyb je ovšem kompenzace na základě výpočtu poměrně komplikovaná. Běžně se proto chyba určuje empiricky – pomocí série měření. Je také jasné, že velikost chyby se na intervalu měřených hodnot mění. Místo jedné hodnoty se proto používá korekční funkce, která se vytvoří pomocí kalibrační tabulky.

Dalším problémem je, že každý prvek měřicího zařízení je zatížen také nejistotou, se kterou měří. Tuto nejistotu nelze jednoznačně určit (pouze interval, ve kterém se hodnota s určitou pravděpodobností nachází). Maximální odchylky použitých komponent v závislosti na teplotě jsou uvedeny v tabulce 7.1 včetně názorného výpočtu pro nejistoty při teplotě 20 °C:

Maximální odchylka senzoru je dána třídou přesnosti a příslušnou normou (viz tabulka 3.2). Pro 20 °C lze odchylku určit následovně:

$$\Delta t_{1max} = (0.3 + 0.005 * |t|) = 0,3 + 0,005 * 20 = 0,4 \text{ °C}$$

Odchylka způsobená vlastním odporem vodičů senzoru je nulová díky 3vodičovému zapojení. Odchylka senzoru vznikající vlivem průchodu excitačního proudu se stanovila odvozením ze vzorce 3.7 s předpokladem, že  $I_{EX} = 1 \text{ mA}$  (tj. vyšší nejistota než 0,3 mA).  $R_t$  je odvozeno ze vzorce 3.1.

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2] = 100 * (1 + 3.9083 * 10^{-3} * 20 - 5,775 * 10^{-7} * 20^2) = 107,794 \text{ } \Omega$$

$$\Delta t_{2max} = \frac{I_{EX}^2 * R_t}{D} = \frac{0,001^2 * 107,794}{0,065} = 0,0017 \text{ °C}$$

Rozlišení převodníku bylo určeno v podkapitole 5.3. Tato nejistota není závislá na měřené teplotě a po převedení na celsiovu teplotu představuje přibližně 0,1 °C. Maximální chyba linearity měřicího zesilovače je 0,05 %. Tato chyba by měla být zahrnuta v celkové chybě, která je dle katalogového listu 0,1 %. To při  $t_{ref} = 20 \text{ °C}$  znamená nejistotu 0,02 °C, při maximální teplotě 100 °C dokonce 0,1 °C.

**Tab. 7.1)** Nejistoty použitých komponent

Referenční teplota	Velikost maximální odchylky pro:				
	Tolerance snímáče	Rozlišení převodníku	Zahřívání $I_{EX}$	Odpor vodičů	Přesnost zesilovače
0 °C	0,3 °C	0,1 °C	0,0015 °C	0 °C	0 °C
10 °C	0,35 °C	0,1 °C	0,0016 °C	0 °C	0,01 °C
20 °C	0,4 °C	0,1 °C	0,0017 °C	0 °C	0,02 °C
30 °C	0,45 °C	0,1 °C	0,0017 °C	0 °C	0,03 °C
40 °C	0,5 °C	0,1 °C	0,0018 °C	0 °C	0,04 °C
50 °C	0,55 °C	0,1 °C	0,0018 °C	0 °C	0,05 °C
60 °C	0,6 °C	0,1 °C	0,0019 °C	0 °C	0,06 °C
70 °C	0,65 °C	0,1 °C	0,0020 °C	0 °C	0,07 °C
80 °C	0,7 °C	0,1 °C	0,0020 °C	0 °C	0,08 °C
90 °C	0,75 °C	0,1 °C	0,0021 °C	0 °C	0,09 °C
100 °C	0,8 °C	0,1 °C	0,0021 °C	0 °C	0,10 °C

Z výše uvedené tabulky je patrné, že chyby vznikající zahříváním senzoru excitačním proudem a vnitřním odporem vodičů jsou zanedbatelné. Maximální chybu naopak způsobuje samotný senzor a s rostoucí teplotou se výrazně zvyšuje také odchylka zesilovače. Rozlišení zesilovače je v kombinaci s použitými komponentami dostačující.

## 7.2 Metody ověření a kalibrace RTD

Přesnost platinových odporových snímačů se musí před uvedením do provozu a po stanovené době ověřovat. Pokud komponenty měřicího systému vykazují špatnou odolnost vůči stárnutí, je nutné ověřování provádět v kratších časových intervalech. Při ověřování se posuzuje, zda snímač měří v rámci specifikovaného tolerančního pole. Cílem kalibrace odporového senzoru je potom určit chybu, se kterou senzor měří. Ověření i kalibrace probíhá pomocí komparačních (srovnávacích) metod s využitím certifikovaných prostředků, které umožní simulovat nebo přesně měřit teplotu v požadovaném rozsahu. [37] [38]

Kalibrace RTD senzorů se realizuje pomocí odporových etalonových teploměrů. Jedná se o certifikované teploměry s vyšší třídou přesnosti, než má kalibrovaný senzor. Proces ověřování probíhá na schválených pracovištích a vyžaduje speciální olejové, fluidní nebo vzdušné lázně, které jsou k tomuto účelu schváleny Českým metrologickým institutem (ČMI). Ověřené snímače, které vyhovují požadavkům, se označí příslušnou známkou, rokem ověření a značkou ověřovacího pracoviště [37]. Při vyhodnocování výsledků se vychází s tolerancí pro danou třídu přesnosti dle ČSN EN 60751.

Pro rychlé ověření RTD senzoru lze využít také teplotní kalibrační pícky. Tato metoda spočívá v tom, že se senzor vloží do kalibrační pícky, jejíž teplotu lze regulovat. V kalibrační píce se nastaví referenční teplota a po ustálení se odečte teplota naměřená kalibrovaným senzorem. Tento proces se opakuje ve všech požadovaných teplotních bodech. Výhodou této metody je snadná a rychlá realizace. Na straně nevýhod jsou ovšem vysoké pořizovací náklady kalibrační pícky (řádově desítky až stovky tisíc korun) a také nižší přesnost (obvykle desetiny °C).

V případě, že pracoviště nedisponuje kalibrační píckou ani teplotní lázní, nebo pokud ověřovaný senzor nelze demontovat, je možné provést ověření pomocí druhého senzoru vyšší přesnosti. Sensory se umístí do vzájemné blízkosti a následně se porovnávají naměřené hodnoty. Nevýhodou je, že nelze korigovat teplotu okolí, takže pro ověřování senzoru v celém rozsahu měření je tato metoda nevhodná.

### Ověření měřicího zesilovače

Kromě senzoru lze posuzovat přesnost také u měřicích zesilovačů (tj. spojovací článek mezi senzorem a A/D převodníkem). Ověření probíhá tak, že se senzor PT100 odpojí a nahradí se vhodným regulovatelným odporem (např. odporová dekáda). Následně lze simulovat teploty na hranicích rozsahu nastavením odporu na 100 a 138,5 ohmů (0 a 100 °C) [20] [38]. Hodnoty napětí pro ověřované body se zaznamenají a pak se určí odchylka od ideálních hodnot, které jsou dány výrobcem, popřípadě normou.

### 7.2.1 Postup kalibrace pro měřicí řetězec s PT100

Snímače teploty lze kalibrovat samostatně (pro určení odchylky senzoru) nebo zapojené v měřicím řetězci (pro určení odchylky celého řetězce). Pokud je to možné, tak se snímače kalibrují bez ochranných jímek (viz obrázek 3.4). Kalibrace probíhá obvykle pro tři referenční teploty (maximum, minimum a střední hodnota rozsahu), ale může se realizovat ve více teplotních bodech. Všechny tyto body ovšem musí náležet do teplotního rozsahu daného senzoru. Kompletní kalibrace obvykle zahrnuje následující zkoušky: [39]

#### Vnější prohlídka a funkční kontrola

V první řadě se kontroluje, zda je dostupná příslušná dokumentace (a zda souhlasí typ a výrobní označení snímače a nastavení prvků měřicího řetězce). Chybějící výrobní číslo nebo značka snímače ovšem není důvodem k vyřazení snímače. U snímače a přírodních kabelů se kontrolují známky mechanického poškození nebo poškození tepelným namáháním. Posuzuje se také stav těsnicích prvků. U výstupního zařízení se musí zkontrolovat stav displeje, shoda popisu s řetězcem a verze softwaru. Při opětovné kalibraci se posuzuje shoda s původním řetězcem.

Funkční kontrola zahrnuje otestování funkčnosti celého měřicího řetězce. Současně se kontroluje odezva na nastavitelné prvky řetězce a zobrazovací prvek (stav, čitelnost a rozlišení displeje).

#### Zkoušku závislosti indikace řetězce na referenční teplotě

Stonek snímače se umístí do bloku kalibrační pícky nebo do teplotní. Ponor teploměru by měl být 15x větší, než je vnější průměr stonku ( $6 \text{ mm} \times 15 = 90 \text{ mm}$ ) a vůle mezi otvorem a snímačem by neměla přesahovat 0,5 mm). Nejprve se nastaví minimální kalibrační teplota a počká se na její ustálení. Pokud po dobu 15 minut nedochází ke změně referenční teploty, provede se kontrolní odečet. Následuje změna referenční teploty (vzestupně) a postup se opakuje. Kontrolní odečet se pro každý posuzovaný teplotní bod provádí vícekrát.

#### Zkouška izolačního odporu a zkouška stability

Kalibrace často zahrnuje také zkoušku izolačního odporu snímače, popřípadě i zkoušku jeho stability. Izolační odpor se měří mezi vodiči vnitřního vedení a pláštěm stonku snímače. Měření se realizuje pro obě polarity napětí a platí nižší naměřená hodnota. [1]

Stabilita odporového snímače se posuzuje u nových a opravovaných snímačů, popřípadě u snímačů používaných v těžkých provozních podmínkách. Nejprve se změří teplota při základním odporu. Následně je snímač na jednu hodinu umístěn do lázně o maximální provozní teplotě zvýšené o  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Po vyjmutí se snímač nechá na vzduchu ochladit na pokojovou teplotu. Pak se opětovně změří teplota při základním odporu. Dovolená změna pro snímače třídy A je  $0,15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , pro snímač třídy B  $0,30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . [1]

#### Vyhodnocení měření

Posledním krokem kalibrace je zhodnocení naměřených hodnot, určení nejistoty měření a vystavení kalibračního listu.



### 7.3 Nejistota kalibračního měření

Nejistota měření je parametr, který charakterizuje celý interval hodnot, které lze racionálně přiřadit k měřené veličině. Z obecného hlediska se rozlišuje nejistota typu A, která vzniká náhodnou chybou při opakovaných měřeních, a nejistota typu B, způsobená známými nebo odhadnutelnými příčinami. Výsledná kombinovaná nejistota je dána podle vztahu: [37]

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (7.1)$$

*kde:  $u_A$  = nejistota typu A  
 $u_B$  = nejistota typu B  
 $u_c$  = kombinovaná nejistota*

Nejistota typu A se s rostoucím počtem opakovaných měření snižuje a vypočítá se jako výběrová směrodatná odchylka (pro alespoň 10 opakovaných měření). Naproti tomu nejistota typu B je na počtu měření nezávislá. Je totiž dána například nedokonalostí použitých měřidel či etalonů, danou metodou měření atd. Dílčí nejistoty typu B se určí jako podíl maximální odchylky zdroje nejistoty a součinitele  $k$ , který je dán typem rozdělení pravděpodobnosti. Velikost maximální odchylky se určuje pomocí údajů od výrobce měřicího zařízení, z kalibračních listů a certifikátů, ale i z výsledků předchozích měření. Důležité jsou také znalosti měřicích podmínek, prostředků, metod a měřeného objektu.

#### 7.3.1 Zdroje nejistot při ověřování RTD

Kalibrační pícka je kovový blok s vnitřní komorou, ve které lze regulovat teplotu, a s vnějšími otvory pro vložení teplotních snímačů. Teplotní lázeň je naopak nádoba s termostatem a obvykle kapalným médiem, do které se snímače vloží. Při výpočtu nejistoty měření typu B je nezbytné zohlednit následující parametry těchto zařízení: [36] [37]

**Stabilita** teploty kalibrační pícky, respektive teplotní lázně. Tento parametr určuje kolísání teploty v určitém časovém intervalu. Obvykle se stabilita pohybuje v rozmezí  $\pm 0,01$  až  $0,1$  °C. Maximální odchylku teplotní stability lze určit pomocí jednoduchého testu, při kterém se monitoruje změna referenční teploty pícky nebo lázně po předem stanovenou dobu.

**Homogenita teplotního pole** je parametr, který ukazuje gradient teploty v pracovním prostoru pícky či lázně. Zásadní je homogenita teplotního pole prostoru, ve kterém je uložen kalibrovaný snímač. Údaj se určuje na základě specifikací výrobce nebo z kalibračních listů. Posuzovat lze vertikální i horizontální homogenitu.

**Přesnost** použitého kalibračního přístroje. Teplotní pícky dosahují přesnosti obvykle  $\pm 0,1$  až  $0,5$  °C. Konkrétní hodnota by měla být dána specifikací výrobce nebo kalibračním listem. Pokud se k určení referenční teploty používá etalonový teploměr, zahrnuje se do výpočtu nejistota etalonu a přesnost pícky či lázně se zanedbává.

**Konečné rozlišení přístroje** pro odečítání měřených hodnot. Na jedné straně se posuzuje rozlišení displeje pícky, termostatu nebo odečítacího zařízení pro etalonové měřidlo. Současně by se ovšem nemělo zapomenout na rozlišení indikačního členu kalibrovaného měřicího řetězce [39]. Může se jednat o rozlišení ohmmetru při kalibraci snímače, popřípadě o rozlišení A/D převodníku při odečítání hodnot napětí přes vytvořený počítačový program.

## 7.4 Návrh a realizace ověření měřicího zařízení

Na základě výše uvedených metod a postupů byl navržen a následně i zrealizován způsob pro ověření měřicího zařízení. Jelikož ovšem laboratoře ÚVSSR nedisponují vhodným zařízením pro ověření přesnosti teploměru, bylo ověření provedeno v sekundární laboratoři pro teplotu a vlhkost Českého metrologického institutu v Brně. Ta je navázána na primární laboratoř ČMI v Praze.

Ověřování dílčích částí měřicího systému má své výhody, avšak je časově náročnější a vyžaduje více technického vybavení. Vzhledem k omezenému přístupu k měřicímu zařízení i kalibračním přístrojům bylo proto zvoleno ověření měřicího řetězce jako celku. Na základě podkapitoly 7.2.1 byla provedena kalibrace v požadovaném rozsahu 0 °C až 100 °C, která zahrnovala vnější prohlídku, funkční kontrolu, kontrolu izolačního odporu, určení odchylky od reference a vyhodnocení. Měření bylo realizováno pro šest teplotních bodů s krokem 20 °C.

Pro měření nejnižší teploty 0 °C byla využita Dewarova nádoba, která se naplnila ledovou tříští a destilovanou vodou. Teploty 20, 40, 60 a 80 °C se měřily ve vodní lázni termostatu LAUDA ECO RE1050 s chlazením. Nejvyšší teplotní bod 100 °C byl ověřen pomocí kalibrační pícky se suchým blokem (typ ISOTECH Hyperion). Při kalibraci snímače s průměrem 6 mm se vyžaduje ponor přes 90 mm [39], ovšem délka stonku použitého snímače je pouze 50 mm. Z toho důvodu byl snímač při měření v kapalinových lázních uložen v hluboké kovové jímce, která současně bránila přímému kontaktu snímače s vodou.



**Obr. 7.1)** Použitá zařízení (zleva): Dewarova nádoba, termostat LAUDA ECO RE1050 s chlazením, kalibrační pícka ISOTECH Hyperion.

Pro určení odchylky měřicího zařízení od reference se využila komparační metoda (tj. srovnávání teplot etalonu a testovaného měřicího zařízení). Jako etalonové měřidlo byl použit vinutý snímač typu PT100 v kombinaci s vysoce přesným čtecím zařízením ASL F250 mk. II. Pro každý teplotní bod bylo odečteno minimálně 10 hodnot.

Před měřením byla provedena vizuální kontrola prvků měřicího řetězce i kontrola správného zapojení dle datových listů. Ty jsou součástí elektronických příloh. Následovala funkční kontrola měřicího řetězce. Funkční kontrola vytvořeného programu byla provedena již dříve pomocí virtuálního generátoru signálu i pomocí potenciometru.

Hlavní částí kalibrace bylo určení odchylky teplot zobrazovaných ve vytvořeném programu od referenčních teplot etalonového snímače. Jako první se ověřovala nejnižší teplota rozsahu ( $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Snímač testovaného zařízení a etalonový snímač se nejprve vložily do Dewarovy nádoby. Po ustálení referenční teploty, což trvalo přibližně 10-20 minut, bylo odečteno několik desítek hodnot, které zobrazoval vytvořený program. Interval mezi odečítanými vzorky činil 10 sekund a k odečítání bylo využito automatické ukládání ve vytvořeném programu. Po celou dobu odečítání se sledovaly změny referenční teploty kvůli ověření stability lázně. Jakmile byly odečteny všechny potřebné údaje, přesunuly se oba snímače do vodní lázně termostatu. Ve vodní lázni se tento postup opakoval pro teploty 20, 40, 60 a  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pro teplotu  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  se použil stejný postup, ovšem snímače se umístily do bloku kalibrační pícky. Po naměření nejvyšší teploty se senzory vrátily do ledové tříště ( $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) pro ověření opakovatelnosti měření. Během kalibrace byla teplota okolí ( $23,3 \pm 0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) a relativní vlhkost vzduchu ( $36 \pm 0,5\text{ }\%$ ).



**Obr. 7.2)** Etalonový senzor a odečítací zařízení ASL F250 mk II (ilustrační foto)

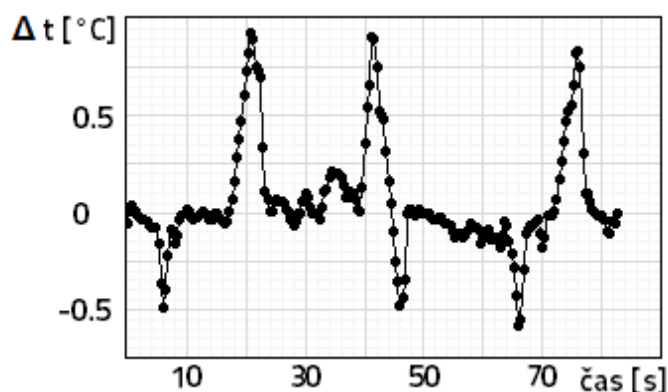
V průběhu celého měření bylo patrné, že testované měřicí zařízení je poměrně nestabilní. Po ustálení se sice teplota pohybovala v úzkém rozmezí s výchylokou přibližně  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , nicméně měření narušovaly časté a rychlé výkyvy, při kterých se teplota měnila až o  $1^{\circ}\text{C}$ . Tyto výkyvy trvaly obvykle několik vteřin a opakovaly se v nepravidelných intervalech (obrázek 7.3). Etalonové měřidlo žádné výkyvy nezaznamenalo. Hodnoty zaznamenané během těchto výkyvů se z dalšího zpracování vyřadily.

Ve snaze zjistit příčinu tohoto chování byla provedena zkouška izolačního odporu snímače. Výsledek zkoušky ovšem vyloučil chybu na snímači. Otestován byl také měřicí zesilovač při teplotě 0 °C, jehož výstupy se z DAQ karty přepojily do kalibrátoru BEAMEX MC2. Tento test ukázal, že hodnoty naměřené kalibrátorem byly bez výkyvů, a navíc byly výrazně blíže referenční hodnotě:

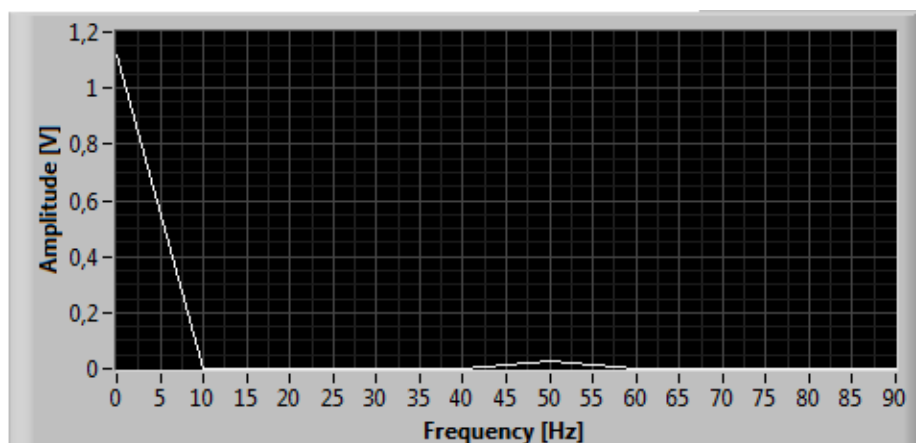
**Tab. 7.2)** Test vlivu A/D převodníku (DAQ karty)

	U	Převod na t
Napětí na výstupu ze zesilovače naměřené kalibrátorem	2,8 mV	0,06 °C
Napětí zobrazené v PC po digitalizaci DAQ kartou	16,3 mV	0,33 °C
Referenční hodnoty	0 mV	0 °C

Podobná odchylka byla naměřena i při dřívějších testech s multimetrem, kdy se ověřovalo propojení DAQ karty a PC. Z provedeného testu vyplývá, že měřicí zesilovač v kombinaci se senzorem funguje dobře a dosahuje vysoké přesnosti. Napětí vstupující do A/D převodníku je tedy správné a bez nežádoucích výkyvů. Hodnoty, které čte PC z převodníku, jsou už ovšem zatížené chybou. Pomocí spektrální analýzy bylo ve vytvořeném programu odhaleno také rušení sítě. V signálovém spektru se totiž nacházela parazitní harmonická složka s frekvencí 50 Hz avšak s minimální amplitudou (obr. 7.4). Ani aktivace LPF ovšem problém s výkyvy nevyřešila. Za zmínku stojí, že většina měření provedených po kalibraci proběhla bez výkyvů, takže by se nemělo jednat ani o chybu programu. Ten navíc zobrazuje vstupní napětí bez jakýchkoli úprav. Výše uvedené poznatky tedy naznačují, že chyba vzniká u A/D převodníku, popřípadě na rozhraní s USB sběrnici. Určení konkrétní příčiny by ovšem vyžadovalo další zkoumání.



**Obr. 7.3)** Výkyvy při kalibračním měření



**Obr. 7.4)** Spektrální analýza signálu z měřicího zařízení

#### 7.4.1 Naměřená data z kalibrace

**Tab. 7.3)** Naměřené hodnoty pro jednotlivé referenční teploty

$t_{\text{etalonu}}$	Naměřená teplota [°C]					Aritmetický průměr [°C]
0 °C	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	<b>0,312</b>
	0,24	0,33	0,33	0,33	0,24	
20 °C	19,72	19,72	19,72	19,81	19,72	<b>19,767</b>
	19,92	19,81	19,72	19,72	19,81	
40 °C	39,60	39,79	39,69	39,60	39,89	<b>39,733</b>
	39,79	39,79	39,60	39,79	39,79	
60 °C	59,45	60,06	59,45	60,06	59,55	<b>59,682</b>
	59,85	59,45	59,65	59,45	59,85	
80 °C	79,87	79,87	79,67	79,56	79,87	<b>79,748</b>
	79,56	80,08	79,56	79,67	79,77	
100 °C	99,81	99,71	99,81	99,81	99,91	<b>99,872</b>
	100,12	99,81	99,91	100,02	99,81	
0 °C	0,33	0,33	0,24	0,33	0,33	<b>0,303</b>
	0,24	0,33	0,33	0,33	0,24	

#### 7.4.2 Určení nejistoty měření

Nejistota měření je stanovena na základě normy *EA-4/02 - Vyjadřování nejistot měření při kalibracích*. Nejistota typu A se určila jako výběrová směrodatná odchylka naměřených vzorků pro každý zkoumaný teplotní bod. Určení nejistoty typu B bylo ovšem komplikovanější. Nejprve se na základě podkapitol 7.1 a 7.3.2 stanovily významné zdroje nejistot kalibračního zařízení. U významných zdrojů nejistot se určila maximální odchylka a výsledná nejistota. K výpočtu byly použity údaje z kalibračních listů použitých kalibračních zařízení a použitého etalonového měřidla, a dále informace z výše uvedené normy a ze zdrojů [36], [37], [38] a [39].

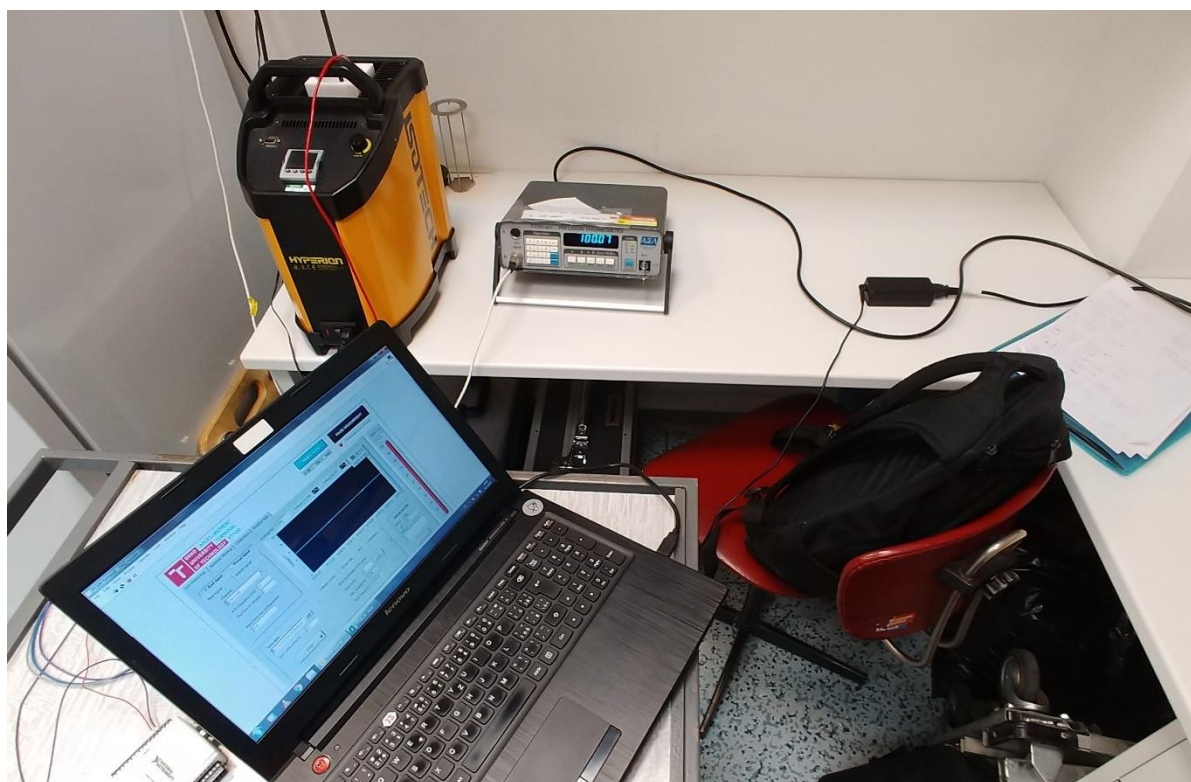
V tabulkách 7.3 a 7.4 jsou uvedeny základní parametry pro určení nejistoty typu B.  $Z_{\text{max}}$  značí maximální odchylku zdroje nejistoty,  $k$  je koeficient pravděpodobnostního rozložení,  $\delta_i$  je základní nejistota měření a  $u_i$  znázorňuje výslednou nejistotu po rozšíření citlivostním koeficientem  $c$ . Tento koeficient se používá v případě, že odchylka zdroje nejistoty není uvedena ve stupních celsia, ale například v ohmech.

**Tab. 7.4)** Tabulka významných zdrojů nejistot

Zdroj nejistoty	Rozložení	k	$Z_{\max}$	$\delta_i$	c	$u_i$ [°C]
Stabilita lázně	rovnoměrné	$\sqrt{3}$	dle zařízení	$\delta_i = \frac{Z_{\max}}{k}$	1	$u_i = c * \delta_i$
Homogenita teplot. pole	rovnoměrné	$\sqrt{3}$	dle zařízení		1	
Rozlišení měřic. řetězce	rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,1 °C		1	
Stabilita etalonu (stárnutí)	rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,015 °C		1	
Kalibrace etalon. měřidla	normální	2	0,025 °C		2,51	
Rozlišení zobr. zařízení	rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,01 °C		1	

**Tab. 7.5)** Nejistoty použitých kalibračních zařízení z kalibračních listů

Zařízení	$Z_{\max}$	
	Stabilita	Homogenita teplot. pole
Dewarova nádoba	0,005 °C	0,02 °C
Vodní lázeň	0,005 °C	0,026 °C
Kalibrační píčka	0,005 °C	0,04 °C



**Obr. 7.5)** Měření teploty 100 °C v laboratoři ČMI v Brně

### Ukázka výpočtu nejistoty měření pro $t_{ref} = 20\text{ °C}$

V první řadě se určil aritmetický průměr z 10 náhodně vybraných naměřených hodnot. Výsledné hodnoty jsou v tabulce 7.3. Aritmetický průměr se následně využil při výpočtu výběrové směrodatné odchylky (nejistoty typu A). Oba použité vzorce jsou uvedeny v kapitole 4.2.6, avšak výpočty se provedly pomocí vytvořeného programu (obr. 6.16).

$$\bar{t}_{20^{\circ}\text{C}} = \frac{19,72 + 19,81 + 19,72 + \dots + 19,72 + 19,81 + 19,72}{10} = 19,767$$

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{9} * [(19,72 - 19,767)^2 + (19,81 - 19,767)^2 + \dots]} = 0,068$$

Nejistota typu B je složena z více složek. Nejprve byla vyhodnocena stabilita lázně. Vycházelo se z kalibračních listů, nicméně při měření se kontrolovalo, zda je stabilita v rámci daných mezí.

$$u_{stab} = c * \delta_{stab} = c * \left(\frac{Z_{max}}{k}\right) = 1 * \left(\frac{0,005}{\sqrt{3}}\right) = 0,0029\text{ °C}$$

Nejistota způsobená nehomogenitou teplotního pole uvnitř lázně/pícky:

$$u_{TG} = c * \delta_{TG} = c * \left(\frac{Z_{max}}{k}\right) = 1 * \left(\frac{0,026}{\sqrt{3}}\right) = 0,0150\text{ °C}$$

Nejistota způsobená rozlišením A/D převodníku:

$$u_{AD} = c * \delta_{AD} = c * \left(\frac{Z_{max}}{k}\right) = 1 * \left(\frac{0,1}{\sqrt{3}}\right) = 0,0577\text{ °C}$$

Nejistota způsobená rozlišením odečítacího zařízení etalonového snímače:

$$u_{ETr} = c * \delta_{ETr} = c * \left(\frac{Z_{max}}{k}\right) = 1 * \left(\frac{0,01}{\sqrt{3}}\right) = 0,00577\text{ °C}$$

Nejistota kalibrace etalonového snímače:

$$u_{ETk} = c * \delta_{ETk} = c * \left(\frac{Z_{max}}{k}\right) = 1 * \left(\frac{0,025}{2}\right) = 0,0125\text{ °C}$$

Nejistota dlouhodobé (roční) stability etalonového snímače:

$$u_{ETs} = c * \delta_{ETs} = c * \left(\frac{Z_{max}}{k}\right) = 1 * \left(\frac{0,015}{\sqrt{3}}\right) = 0,0087\text{ °C}$$



Celková rozšířená nejistota  $U$  se vypočítala pomocí nejistoty typu A a nejistoty typu B (tzv. kombinovaná standardní nejistota  $u_c$ ). Pro spolehlivost 95 % je konfidenční koeficient  $\kappa$  roven 2.

$$u_B = \sqrt{u_{stab}^2 + u_{TG}^2 + u_{AD}^2 + u_{ETr}^2 + u_{ETk}^2 + u_{ETs}^2} = \sqrt{0,0029^2 + \dots + 0,0087^2} = 0,062 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$U = \kappa * u_c = \kappa * \sqrt{u_B^2 + u_A^2} = 2 * \sqrt{0,068^2 + 0,062^2} = 0,184 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Pomocí výše uvedeného postupu se spočítala nejistota měření pro každý analyzovaný teplotní bod. Výsledné hodnoty jsou zaznamenány v následující tabulce a celý proces kalibrace je shrnut ve vypracovaném protokolu, který je součástí příloh. Výsledky v protokolu jsou zaokrouhleny na jedno desetinné místo, jelikož vyšší přesnost je vzhledem k rozlišení použitého převodníku irelevantní.

**Tab. 7.6)** Výsledné nejistoty měření

Referenční teplota	Nejistota měření				
	$u_A$ [°C]	$u_B$ [°C]	$u_c$ [°C]	konfidenční koeficient $\kappa$	$U$ [°C]
0 °C	0,038	0,061	0,072	2	<b>0,144</b>
20 °C	0,068	0,062	0,092	2	<b>0,184</b>
40 °C	0,103	0,062	0,120	2	<b>0,240</b>
60 °C	0,253	0,062	0,261	2	<b>0,522</b>
80 °C	0,174	0,062	0,185	2	<b>0,369</b>
100 °C	0,121	0,064	0,137	2	<b>0,274</b>



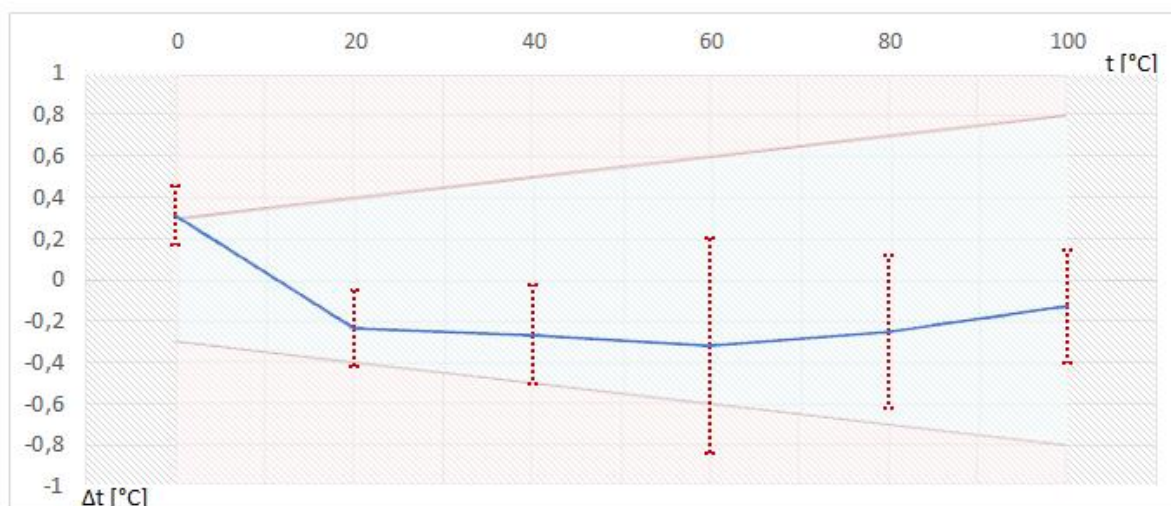
## 7.5 Vyhodnocení naměřených dat

Naměřené a vypočítané hodnoty poukazují na to, že přesnost měřicího zařízení je poměrně dobrá, avšak vyšší nestabilita se i přes vyřazení chybných vzorků výrazně projevila na nejistotě typu A a tím pádem i na výsledné kombinované nejistotě.

**Tab. 7.7)** Výsledky ověření měřicího zařízení

Referenční hodnota	Naměřená hodnota (aritmetický průměr)	Rozšířená nejistota měření	Odchylka naměřené teploty od $t_{ref}$
0 °C	0,31 °C	$\pm 0,14$ °C	0,31 °C
20 °C	19,77 °C	$\pm 0,18$ °C	-0,23 °C
40 °C	39,73 °C	$\pm 0,24$ °C	-0,27 °C
60 °C	59,68 °C	$\pm 0,52$ °C	-0,32 °C
80 °C	79,75 °C	$\pm 0,37$ °C	-0,25 °C
100 °C	99,87 °C	$\pm 0,28$ °C	-0,13 °C

Hodnoty uvedené v tabulce výše byly vyneseny do grafu, kde se následně porovnály s tolerancí použitého snímače (třída přesnosti B, viz tabulka 3.2). Graf ukázal, že pouze první naměřený bod se dostal mimo povolenou toleranci. Ostatní body byly v povoleném pásmu, ovšem při zohlednění nejistot měření se mimo toleranční pole dostaly další tři body. Posuzování přesnosti celého měřicího řetězce podle tolerance snímače je v souladu s kalibračním postupem KP 3.1.3/07/18. Avšak v případě, že jsou naměřené hodnoty mimo toleranční pole, mělo by dojít k výměně snímače či vadných částí řetězce.



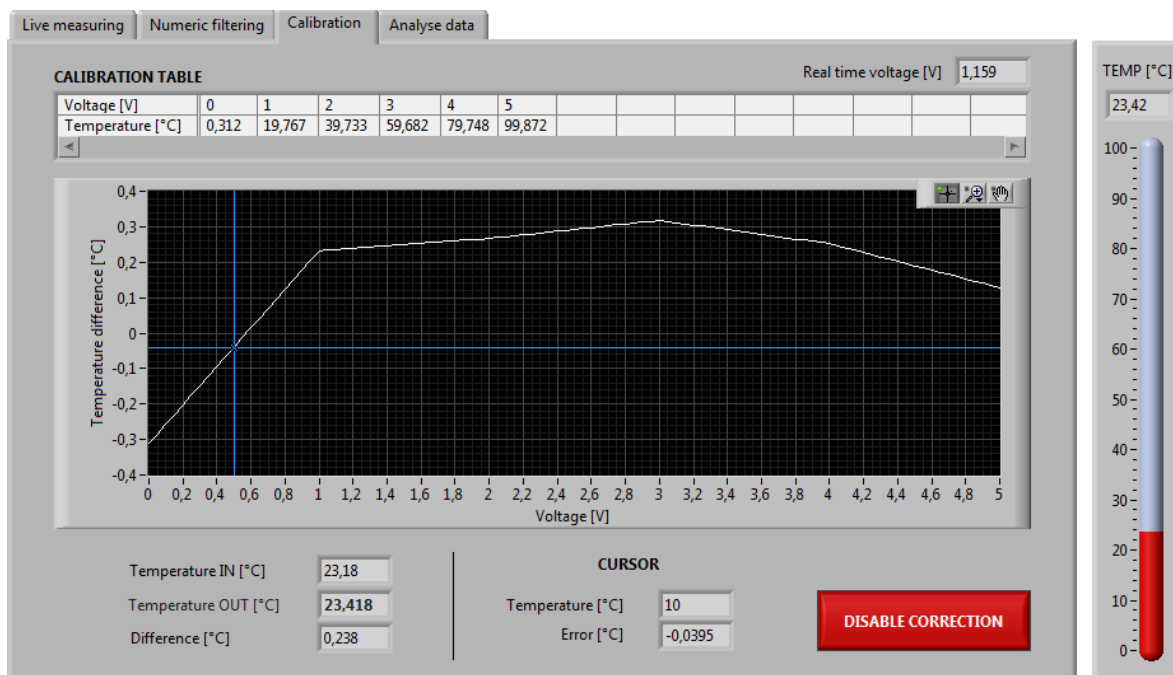
**Obr. 7.6)** Křivka závislosti odchylky na teplotě (modrá) před korekcí. Červené sloupce značí rozsah nejistot měření, modře šrafované pozadí je toleranční pole pro snímače třídy B

### 7.5.1 Adjustace vytvořeného programu

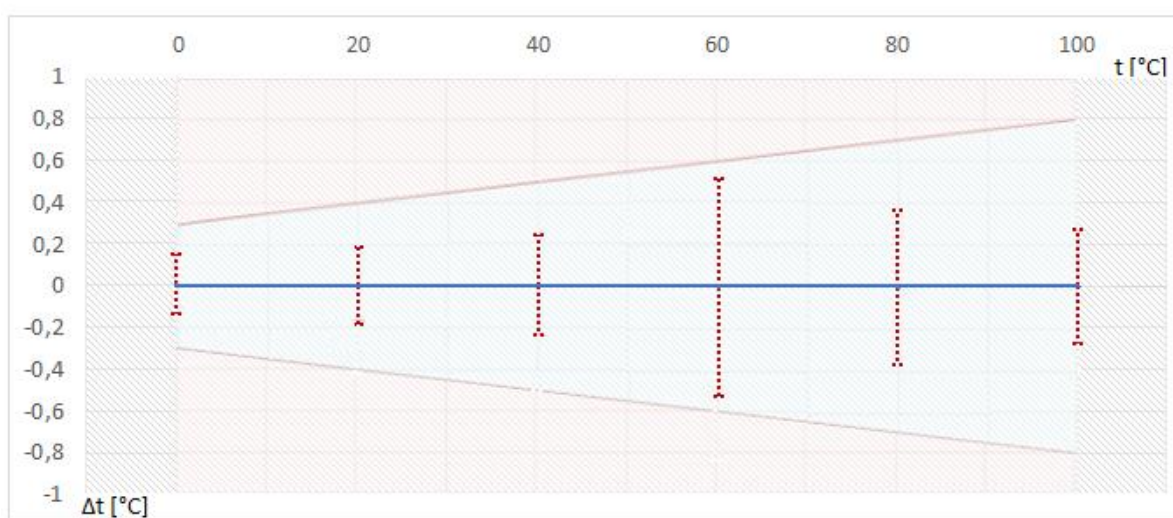
Otočením křivky z grafu 7.6 kolem osy x získáme korekční křivku (obr. 7.7), která je grafickým vyjádřením korekční funkce. Přičtením příslušné hodnoty z korekční funkce k měřené teplotě lze efektivně potlačit zjištěnou odchylku. Například u testovaného zařízení se naměřené hodnoty včetně nejistot díky korekci dostávají do požadovaného tolerančního

rozsahu (obr. 7.8). Korekce má ovšem smysl pouze tehdy, pokud má měřicí zařízení dobrou opakovatelnost měření, což bylo v rámci kalibrace experimentálně ověřeno.

Po zadání výsledků z kalibrace do tabulky ve vytvořeném programu se automaticky vykreslí korekční křivka. Hodnoty z kalibrace jsou v programu přednastavené, ovšem korekce se musí aktivovat v příslušném okně. Pro vytvoření korekční funkce je nezbytné kalibrovat alespoň tři teplotní body: ideálně minimální teplota rozsahu, maximální teplota rozsahu a střední teplota v daném rozsahu. Tři body lze proložit kvadratickým polynomem (tj. polynomem druhého stupně), pro více bodů se běžně používá lineární interpolace. Samozřejmě, že s počtem bodů v korekční křivce roste i přesnost výsledné korekce.



**Obr. 7.7)** Korekční křivka po vložení do vytvořeného programu



**Obr. 7.8)** Křivka závislosti odchylky na teplotě (modrá) po korekci. Červené sloupce značí rozsah nejistot měření, modře šrafované pozadí je toleranční pole pro snímače třídy B

## 8 ZÁVĚR

Hlavním cílem této diplomové práce bylo vytvoření počítačového programu na bázi LabVIEW pro komunikaci se zařízením k měření teploty. Toto zařízení bylo sestaveno z přidělených komponent se specifikacemi dle zadání. Zhodnocení použitých komponent a sestavení měřicího řetězce bylo uvedeno v kapitole 5.

Prvotní vizí byl program, který bude se zařízením komunikovat skrze USB port a který bude měřené veličiny zobrazovat takřka v reálném čase. Z tohoto důvodu bylo nezbytné seznámení s programovacím prostředím LabVIEW a se základními principy grafického programovacího jazyka. Cenným zdrojem informací byly v tomto ohledu diskusní fóra a tutoriály na webu National Instruments. Program vznikl postupně a s přibývajícimi prvky bylo nutné celý koncept programu několikrát přepracovat. Pro lepší přehled byl výsledný program rozčleněn na více prvků, které byly spolu s návodem k obsluze blíže popsány v kapitole 6. Vytvořený program dle požadavků umožňuje ukládání naměřených dat, číselové filtrování i využití korekční funkce. Zahrnuty jsou ale i některé další nástroje, které by na základě poznatků z kapitoly 4 mohly při měření najít praktické využití.

Přesnost měřicího zařízení byla ověřena pomocí certifikovaného teplotního snímače v laboratoři ČMI v Brně. Jelikož se ověření realizovalo pro celý požadovaný rozsah (0 až 100 °C) s krokem 20 °C, bylo využito více kalibračních zařízení. Přesnost měřicího zařízení se posoudila pomocí statistického vyhodnocení naměřených dat s přihlédnutím k nejistotě měření. Během kalibračního měření byla patrná vyšší nestabilita měřicího řetězce způsobená nežádoucím kolísáním napětí. Na základě několika testů se vyloučila chyba na snímači i měřicím zesilovači, avšak konkrétní příčina odhalena nebyla. Jako možná příčina se nabízí vnější rušení, což by vysvětlovalo, proč k jevu nedocházelo při každém měření. Jedná se ovšem o nepodloženou hypotézu, kterou nelze prokázat bez dalších testů.

Vytvořený program byl při ověřování využit nejen jako indikační zařízení, ale také k ukládání naměřených hodnot či k analýze signálu. Při následném vyhodnocování dat se používala funkce offline analýzy pro výpočet aritmetických průměrů a nejistot typu A. Přímo v praxi bylo tedy ověřeno, že program funguje a nabízí řadu praktických nástrojů. Současně se ovšem ukázalo několik nedostatků. Ty souvisely převážně s uživatelskou přívětivostí a byly blíže popsány v kapitole 6. Celkově ovšem program fungoval bez chyb, které by měření mohly znehodnotit.

Praktické části předcházela rozsáhlá teoretická příprava, zaměřená primárně na problematiku odporových snímačů teploty a analýzu signálu. Teoretická příprava sehrávala důležitou roli v průběhu programování i při práci s měřicím zařízením. Poznání principů odporových teploměrů a znalost jejich nedostatků totiž umožňuje lépe předcházet chybám, popřípadě předvídat požadavky budoucích uživatelů programu. Právě teoretická část je tedy klíčem k tomu, jaký význam mají jednotlivé prvky vytvořeného programu a jaké parametry při nastavování programu volit pro dosažení optimálních výsledků.

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ROHAN, Zbyněk. *Měření a kalibrace odporových teploměrů*. Ostrava, 2015. Diplomová práce. Technická universita Ostrava. Vedoucí práce Doc. Ing. Ivo Neborák, CSc.
- [2] KULHÁNEK, Petr. *Z kuchyně do vesmíru, aneb, Třináctero příběhů neobyčejně obyčejných*. Praha: AGA, 2016. ISBN 978-80-904582-9-1.
- [3] MAREŠ, Luděk. Teplota a její měření. *Tzb-info* [online]. Praha: Topinfo, 2006 [cit. 2019-02-02]. Dostupné z: <https://vytapieni.tzb-info.cz/mereni-a-regulace/3115-teplota-a-jeji-mereni>
- [4] A temperature below absolute zero: Atoms at negative absolute temperature are the hottest systems in the world. *MAX PLANCK GESELLSCHAFT* [online]. Německo, Mnichov: Max-Planck-Gesellschaft, 2013 [cit. 2019-02-01]. Dostupné z: <https://www.mpg.de/research/negative-absolute-temperature>
- [5] Proč měříme teplotu ve stupních Celsia? Boj o stupnice stále nemá vítěze. *ČT24* [online]. Česko: Česká televize, 2017 [cit. 2019-02-01]. Dostupné z: <https://ct24.ceskatelevize.cz/veda/2019780-proc-merime-teplotu-ve-stupnich-celsia-boj-o-stupnice-stale-nema-viteze>
- [6] BUREŠ, Jiří. Teplota. *ConVERTER* [online]. Česko, 2002 [cit. 2019-02-01]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/prevody/teplota.htm>
- [7] HAMMER, Miloš. 8. *Termodiagnostika - posouzení teplotního stavu objektu*. [Přednáška]. Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické, Brno, 2018.
- [8] NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION, . *Application Note 046: Measuring Temperature with RTDs* [online]. In: . 1996, s. 8 [cit. 2019-01-29].
- [9] MCCARTHY, Mary a Aine MCCARTHY. ADC REQUIREMENTS FOR RTD TEMPERATURE MEASUREMENT SYSTEMS. *Analog Devices* [online]. Norwood, Massachusetts, USA: Analog Devices, Inc., 2015 [cit. 2019-02-15]. Dostupné z: [https://www.mouser.com/pdfdocs/ADI\\_ADC-Requirements-for-RTD-Temperature-Measurement-Systems.pdf](https://www.mouser.com/pdfdocs/ADI_ADC-Requirements-for-RTD-Temperature-Measurement-Systems.pdf)
- [10] BALOGH, Richard. *Spracovanie signálu zo snímačov teploty* [online]. Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2014 [cit. 2019-01-28]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/228884116>
- [11] Chapter 1 Study of temperature sensors: Pt100. *Umeå University* [online]. Švédsko: Umeå University, 2017 [cit. 2019-03-13]. Dostupné z: [http://www.moodle2.tfe.umu.se/pluginfile.php/41127/mod\\_resource/content/1](http://www.moodle2.tfe.umu.se/pluginfile.php/41127/mod_resource/content/1)
- [12] How to calibrate an RTD or Platinum Resistance Thermometer (PRT). *Cole-Parmer: scientific experts* [online]. Vernon Hills, USA, 2018 [cit. 2019-02-04]. Dostupné z:

<https://www.coleparmer.com/tech-article/how-to-calibrate-a-rtd-or-prt>

- [13] WU, Joseph. A Basic Guide to RTD Measurements. *Texas Instruments* [online]. Texas, USA: Texas Instruments Incorporated, 2018 [cit. 2019-02-15]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/sbaa275/sbaa275.pdf>
- [14] Frequently Asked Questions - Resistance Temperature Detectors (RTD) including Pt100 & Pt1000 sensors. *Sterling Sensors* [online]. Oldham, Velká Británie: Sterling Sensors UK Ltd, b.r. [cit. 2019-02-04]. Dostupné z: <https://www.sterlingsensors.co.uk/rtd-faqs>
- [15] WEBSTER, John. *The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*. 1. Florida, USA: CRC Press LLC, 1999. ISBN 9780849321450.
- [16] *Analýza a zpracování signálů (AZS)* [online]. Plzeň: Fakulta aplikovaných věd - Západočeská univerzita v Plzni, 2014 [cit. 2019-02-07]. Dostupné z: <http://www.kiv.zcu.cz/~mautner/Azs/>
- [17] *Číslíková filtrace, analýza a restaurace signálů*. 2. upr. a rozš. vyd. Brno: VUTIMUM, 2002. ISBN 80-214-2911-9.
- [18] KROLICZEK, Filip. *Sběr a zpracování dat pomocí LabVIEW*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Soňa Šedivá.
- [19] BALL, Stuart. Analog-to-Digital Converters. *EETimes* [online]. 2001 [cit. 2019-02-11]. Dostupné z: [https://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1276974#](https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1276974#)
- [20] SNOPEK, Petr. *Přesný termostat*. Brno, 2006. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Dr. Ing. Zdeněk Kolka.
- [21] Analog to Digital Conversion. *Measurement Computing* [online]. Norton, Massachusetts, USA, b.r. [cit. 2019-02-14]. Dostupné z: <https://www.mccdaq.com/PDFs/specs/Analog-to-Digital.pdf>
- [22] ASHLOCK, David a Anjelica WARREN. The Engineer's Guide to Signal Conditioning. *National Instruments* [online]. <http://ni.com>, 2015 [cit. 2019-02-11]. Dostupné z: [ftp://ftp.ni.com/evaluation/signal\\_conditioning/20712\\_Benefits\\_of\\_Integrated\\_SC\\_WP\\_HL.pdf](ftp://ftp.ni.com/evaluation/signal_conditioning/20712_Benefits_of_Integrated_SC_WP_HL.pdf)
- [23] Operační zesilovače. *VŠB - Technická univerzita Ostrava* [online]. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2000 [cit. 2019-02-14]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~sla10/elektronika/elektronika4a.pdf>
- [24] Operační zesilovače polopatě 1 - 3. *RoboDoupě: web nejen o robotice* [online]. 2016 [cit. 2019-02-13]. Dostupné z: <http://robodoupe.cz/2016/operacni-zesilovace-polopate-1/>
- [25] MORAVEC, Stanislav. Stejnoseměrné zesilovače. *SPŠE - slaboproud* [online]. Plzeň, 2001 [cit. 2019-02-13]. Dostupné z: <http://slaboproud.sweb.cz/elt2/stranky1/elt028.htm>

- [26] AGARWAL, Anant a Jeffrey LANG. *Foundations of Analog and Digital Electronic Circuits*. Elsevier: Morgan Kaufman Publishers, 2005. ISBN 1-55860-735-8.
- [27] NANDHINI, C. a M. JAGADEESWARI. Measurement of temperature using RTD and software signal conditioning using LabVIEW. *International Journal of Emerging Technology in Computer Science & Electronics (IJETCSE)* [online]. 2016, **20**(2) [cit. 2019-02-18]. ISSN 0976-1353.
- [28] HAMPL, Lukáš. *ČÍSLICOVÁ FILTRACE – VÝUKOVÁ SIMULACE*. Brno, 2016. Bakalářská práce. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Soňa Šedivá.
- [29] SMITH, Steven. *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. 2. vydání. USA: California Technical Publishing, 1999. ISBN 0-9660176-4-1. Dostupné také z: [https://users.dimi.uniud.it/~antonio.dangelo/MMS/materials/Guide\\_to\\_Digital\\_Signal\\_Process.pdf](https://users.dimi.uniud.it/~antonio.dangelo/MMS/materials/Guide_to_Digital_Signal_Process.pdf)
- [30] *Introduction to statistical quality control*. 6th ed. Hoboken, N.J.: Wiley, 2009. ISBN 978-0-470-16992-6.
- [31] National Instruments: Testovací, měřicí a integrované systémy. *National Instruments* [online]. Austin, Texas: Agent c/o Legal Department National Instruments, 2018 [cit. 2018-11-12]. Dostupné z: <http://www.ni.com/cs-cz.html>
- [32] *CONRAD* [online]. Berlín, Německo: Conrad Electronic International GmbH & CoKG, 2019 [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <https://www.conrad.com/>
- [33] What Is Data Acquisition?. *National Instruments* [online]. Austin, Texas: Agent c/o Legal Department National Instruments, 2018 [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/>
- [34] LEJSKA, Zdeněk. *Rešeršní studie problematiky zpracování dat v prostředí NI LabVIEW*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Jiří Kovář.
- [35] VLACH, Jaroslav, Josef HAVLÍČEK a Martin VLACH. *Začínáme s LabVIEW*. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-245-9.
- [36] SKALICKÝ, David. *Kalibrace kontaktních a bezkontaktních teploměrů*. Vysoké učení technické v Brně, 2016. Diplomová práce. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Martin Frk.
- [37] ZÁBOJ, Jakub. *Kalibrace snímačů teplot*. Brno, 2009. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
- [38] ČSN EN 60751. *Průmyslové platinové odporové teploměry a platinové teplotní senzory*. 2014. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, b.r. Třídící znak 258340.

- [39] KP 3.1.3/07/18. *Kalibrační postup: Řetězec pro měření teplot s platinovými snímači*. Praha: Česká metrologická společnost, z.s., 2018. Dostupné také z: [http://spolky.csvts.cz/cms/sites/default/files/kp\\_3130718\\_retezec\\_pt.pdf](http://spolky.csvts.cz/cms/sites/default/files/kp_3130718_retezec_pt.pdf)

## 9.1 Seznam zdrojů použitých obrázků

- [41] *Wikipedia: The free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 2006 [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://www.wikipedia.org/>
- [42] Platinum RTD: Probe construction. *RdF Corporation* [online]. Hudson, USA: RdF Corporation [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: [http://www.rdfcorp.com/anotes/pa-r/pa-r\\_01.shtml](http://www.rdfcorp.com/anotes/pa-r/pa-r_01.shtml)
- [43] Bimetal Thermometer Principle. *Instrumentation Forum* [online]. Instrumentation Forum [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://instrumentationforum.com/t/bimetal-thermometer-principle/2635>
- [44] Digital Data Acquisition System Block Diagram. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/File:DigitalDAQv2.pdf>
- [45] Digital Filtering. *McGill University* [online]. Canada: McGill University [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://www.music.mcgill.ca/~gary/307/week2/filters.html>

## 10 SEZNAM POUŽÍVANÝCH ZKRATEK A VELIČIN

ZKRATKA	PŮVOD	VÝZNAM
ITS-90	International Temp Scale of 1990	Mezinárodní teplotní stupnice
RTD	Resistance-Temperature Detector	Odporový snímač teploty
R-T	Resistance-Temperature	Závislost teploty na odporu
PT	Platinum	Platina
PRTD	Platinum RTD	Platinový odporový snímač teploty
DAQ	Data AcQuisition	Sběr dat
A/D	Analog-to-Digital converter	Analogově digitální převodník
D/A	Digital-to-Analog converter	Digitálně analogový převodník
FIR	Finite Impulse Response	Filtr s konečnou impulzní odezvou
IIR	Infinite Impulse Response	Filtr s nekonečnou impulzní odezvou
OZ	Operační Zesilovač	Operační zesilovač
MA	Moving Average	Klouzavý průměr
FFT	Fast Fourier Transform	Rychlá Fourierova transformace
LPF	Low-Pass Filter	Filtr typu dolní propust
HPF	High-Pass Filter	Filtr typu horní propust
BPF	Band Pass Filter	Filtr typu pásmová propust
SPF	Band Stop Filter	Filtr typu pásmová zadrž
VI	Virtual Instrument	Virtuální instrument
ČMI	Český Metrologický Institut	Český Metrologický Institut
DFT	Discrete Fourier Transform	Diskrétní Fourierova transformace
sub-VI	Sub Virtual Instrument	dílčí prvek pro stavbu VI

VELIČINA	JEDNOTKA	POPIS
U	[V]	napětí
I	[A]	proud
R	[Ω]	elektrický odpor [ohm]
R <sub>t</sub>	[Ω]	měrný elektrický odpor teploměru při teplotě t
R <sub>0</sub>	[Ω]	měrný elektrický odpor teploměru při teplotě 0 °C
A	[°C <sup>-1</sup> ]	lineární teplotní koeficient odporu
B	[°C <sup>-2</sup> ]	kvadratický teplotní koeficient odporu
C	[°C <sup>-3</sup> ]	mocninný teplotní koeficient 3. řádu
W <sub>t</sub>	[-]	odporový poměr
T	[K]	termodynamická teplota
t	[°C]	teplota (celsiova)
u <sub>A</sub>	[°C]	nejistota typu A
u <sub>B</sub>	[°C]	nejistota typu B
u <sub>C</sub>	[°C]	kombinovaná standartní nejistota
Z <sub>max</sub>	[°C]/[Ω]	maximální odchylka zdroje nejistoty
δ <sub>i</sub>	[°C]/[Ω]	základní nejistota měření
u <sub>i</sub>	[°C]	výsledná nejistota po rozšíření
f	[Hz]	frekvence
α	[-]	teplotní koeficient



## 11 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Označení	Název obrázku	Strana
Obr 3.1	Teploměry	16
Obr 3.2	Platinové RTD: vinutý snímač a plošný snímač	17
Obr 3.3	Závislost odporu na teplotě pro kovové a polovodičové RTD	18
Obr. 3.4	Různé typy platinových RTD	19
Obr. 3.5	Křivka závislosti odporu R na teplotě t pro snímač PT100	21
Obr. 3.6	Čtyřvodičové zapojení RTD	23
Obr. 3.7	Možnosti třívodičového zapojení RTD	23
Obr. 3.8	Dvouvodičové zapojení RTD	24
Obr. 4.1	Grafická interpretace signálu	25
Obr. 4.2	Proces zpracování signálu	26
Obr. 4.3	Ukázka aliasingu	27
Obr. 4.4	Stejnoseměrný operační zesilovač – neinvertující zapojení	30
Obr. 4.5	Chyba měření, která vznikne zanedbáním nelinearity	31
Obr. 4.6	Frekvenční charakteristiky pro LPF, HPF, BSF a BPF	32
Obr. 4.7	Impulzní odezva filtrů FIR a IIR	32
Obr. 4.8	Frekvenční charakteristika základních aproximací	33
Obr. 4.9	Schéma IIR filtru	34
Obr. 4.10	Signál v časové a frekvenční oblasti	37
Obr. 5.1	Systém sběru dat	38
Obr. 5.2	Použitý senzor, model EMKO RTS-M06-L050-K02	39
Obr. 5.3	Použitý měřicí zesilovač, model Enda MU-PT100-U010-0/200	40
Obr. 5.4	Použitá DAQ zařízení a schéma vstupů, model NI USB-6008	41
Obr. 5.5	Schéma zapojení měřicího systému	42
Obr. 6.1	Schéma virtuální instrumentace LabVIEW	44
Obr. 6.2	Virtuální generátor napětí (vlevo) a příslušný blokový diagram	45
Obr. 6.3	Panel pro nastavení parametrů sběru dat a jeho blokový diagram	46
Obr. 6.4	Nastavení koeficientů rovnice pro převod napětí na teplotu	47
Obr. 6.5	Převodník jednotek teploty	48
Obr. 6.6	Nastavení a indikátory pro klouzavý průměr	48
Obr. 6.7	Určení minimální a maximální teploty při měření	49
Obr. 6.8	Ukládání souboru do formátu excel	50
Obr. 6.9	Ukázka uloženého souboru	50
Obr. 6.10	Grafické a numerické výstupy měření	51
Obr. 6.11	Okno pro spektrální analýzu a generátor pro vzorek signálu	52
Obr. 6.12	Okno pro nastavení filtrů	53
Obr. 6.13	Blokový diagram pro filtry, spektrální analýzu a generátor signálu	54
Obr. 6.14	Blokový diagram kalibrační funkce	54
Obr. 6.15	Čelní panel nástroje pro korekci teploty	55
Obr. 6.16	Záložka pro analýzu off-line dat	56
Obr. 6.17	Nástroje analýzy: aproximace, filtrování, histogram, statistika	57
Obr. 6.18	Blokový diagram záložky <i>Analyse data</i>	58
Obr. 6.19	Schéma struktury vytvořeného programu	58
Obr. 6.20	Vytvořený program	59

Obr. 7.1	Použitá kalibrační zařízení	66
Obr. 7.2	Etalonový senzor a odečítací zařízení ASL F250 mk II	67
Obr. 7.3	Výkyvy při kalibračním měření	68
Obr. 7.4	Spektrální analýza signálu z měřicího zařízení	68
Obr. 7.5	Měření teploty 100 °C v laboratoři ČMI v Brně	70
Obr. 7.6	Křivka odchylky od referenční křivky před korekcí	73
Obr. 7.7	Korekční křivka po vložení do vytvořeného programu	74
Obr. 7.8	Křivka odchylky od referenční křivky po korekci	74

Označení	Název tabulky	Strana
Tab. 2.1	Teplotní stupnice a převodní vztahy na Kelvinovu stupnici	13
Tab. 3.1	Koeficienty pro jednotlivé standardy	21
Tab. 3.2	Třídy přesnosti pro snímače PT100 dle IEC 60751	21
Tab. 4.1	Charakteristiky vybraných A/D převodníků	29
Tab. 4.2	Rozdíly FIR a IIR filtrů	33
Tab. 5.1	Srovnání vybraných RTD senzorů	39
Tab. 5.2	Srovnání vybraných analogových měřicích převodníků pro PT100	40
Tab. 5.3	Srovnání vybraných DAQ zařízení	41
Tab. 7.1	Nejistoty použitých komponent	62
Tab. 7.2	Test vlivu A/D převodníku (DAQ karty)	68
Tab. 7.3	Naměřené hodnoty pro jednotlivé referenční teploty	69
Tab. 7.4	Tabulka významných zdrojů nejistot	70
Tab. 7.5	Nejistoty použitých kalibračních zařízení z kalibračních listů	70
Tab. 7.6	Výsledné nejistoty měření	72
Tab. 7.7	Výsledky ověření měřicího zařízení	73

## 12 SEZNAM PŘÍLOH

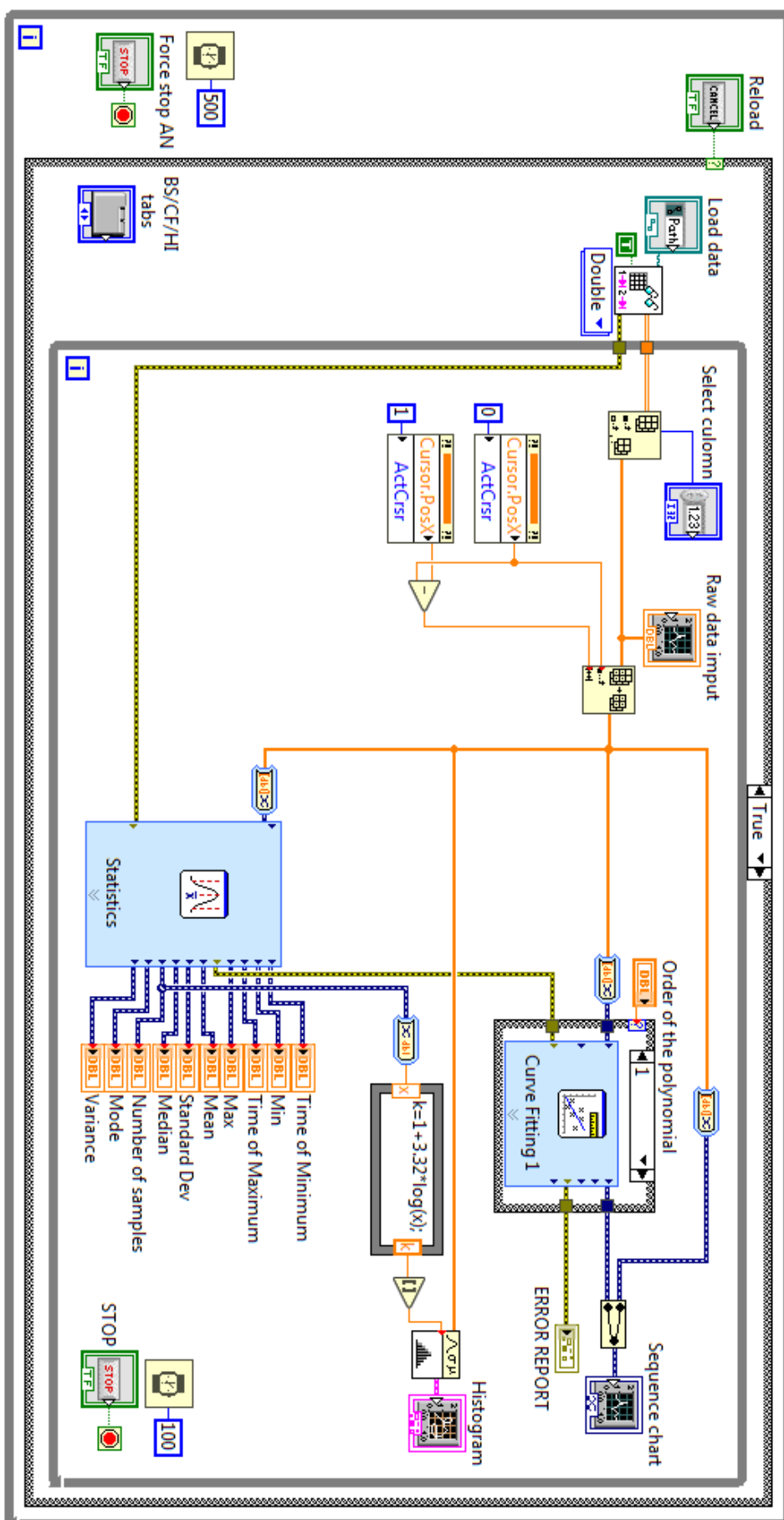
### Textové přílohy

<b>PŘÍLOHA A</b> – Blokový diagram programu pro analýzu dat .....	84
<b>PŘÍLOHA B</b> – Blokový diagram programu pro měření .....	85
<b>PŘÍLOHA C</b> – Protokol o ověření správnosti měřicího zařízení.....	88

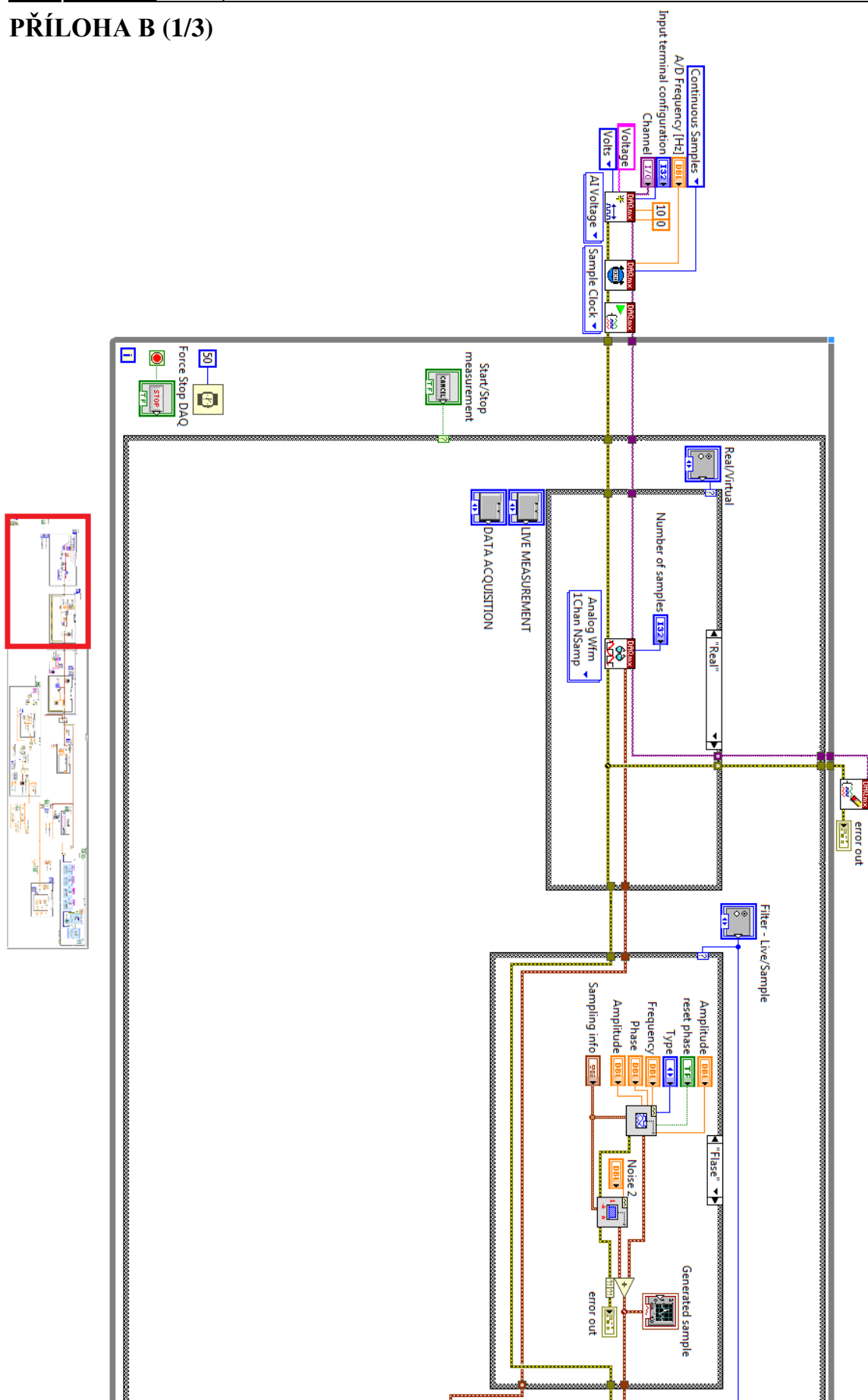
### Obsah přiloženého CD

Vytvořený program v původním formátu VI  
Vytvořený program ve formátu EXE  
Datové listy použitých komponent  
Kopie diplomové práce ve formátu PDF  
Protokol o ověření správnosti měřicího zařízení ve formátu PDF  
Obrázek kompletního blokového diagramu v původní velikosti

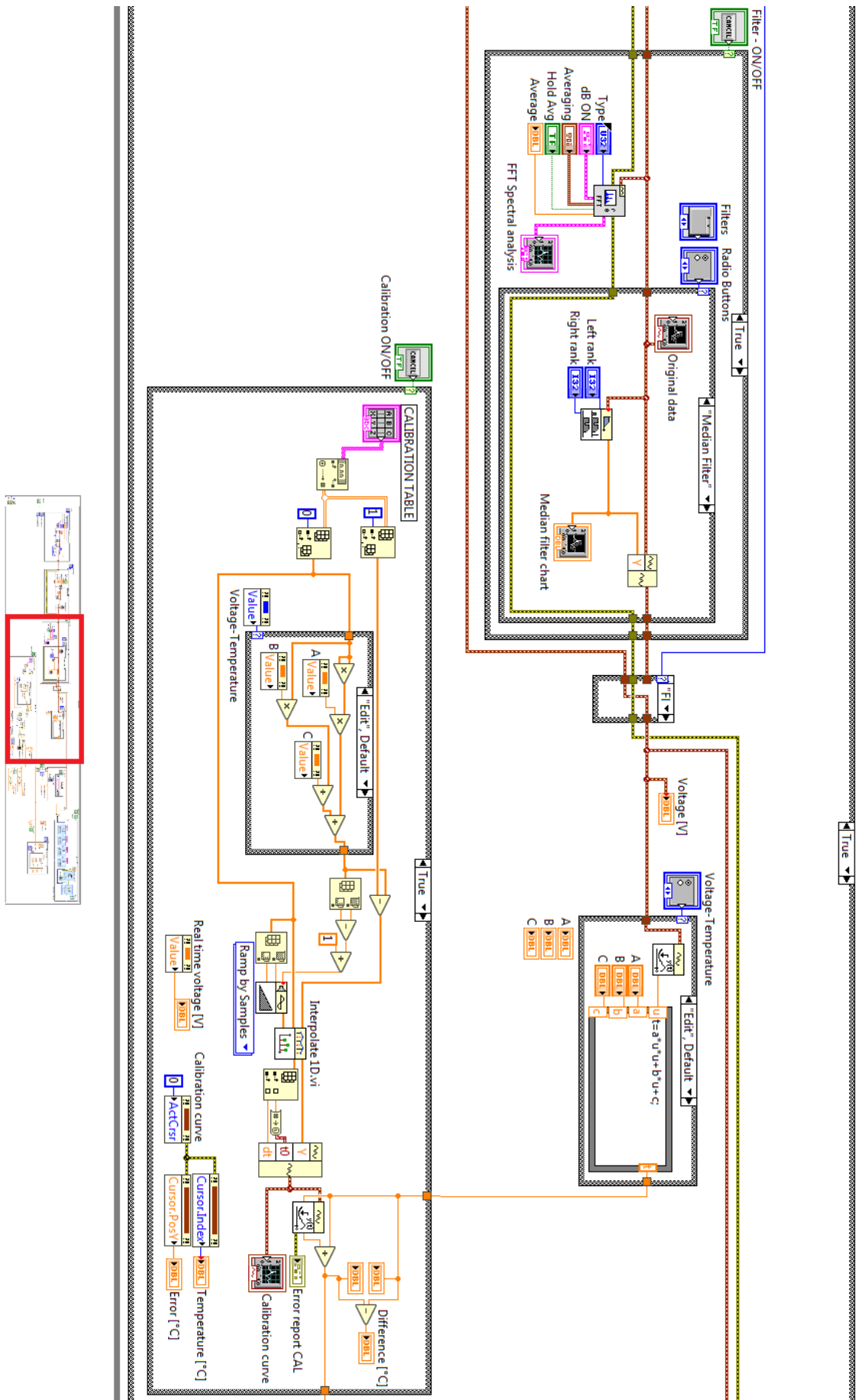
## PŘÍLOHA A

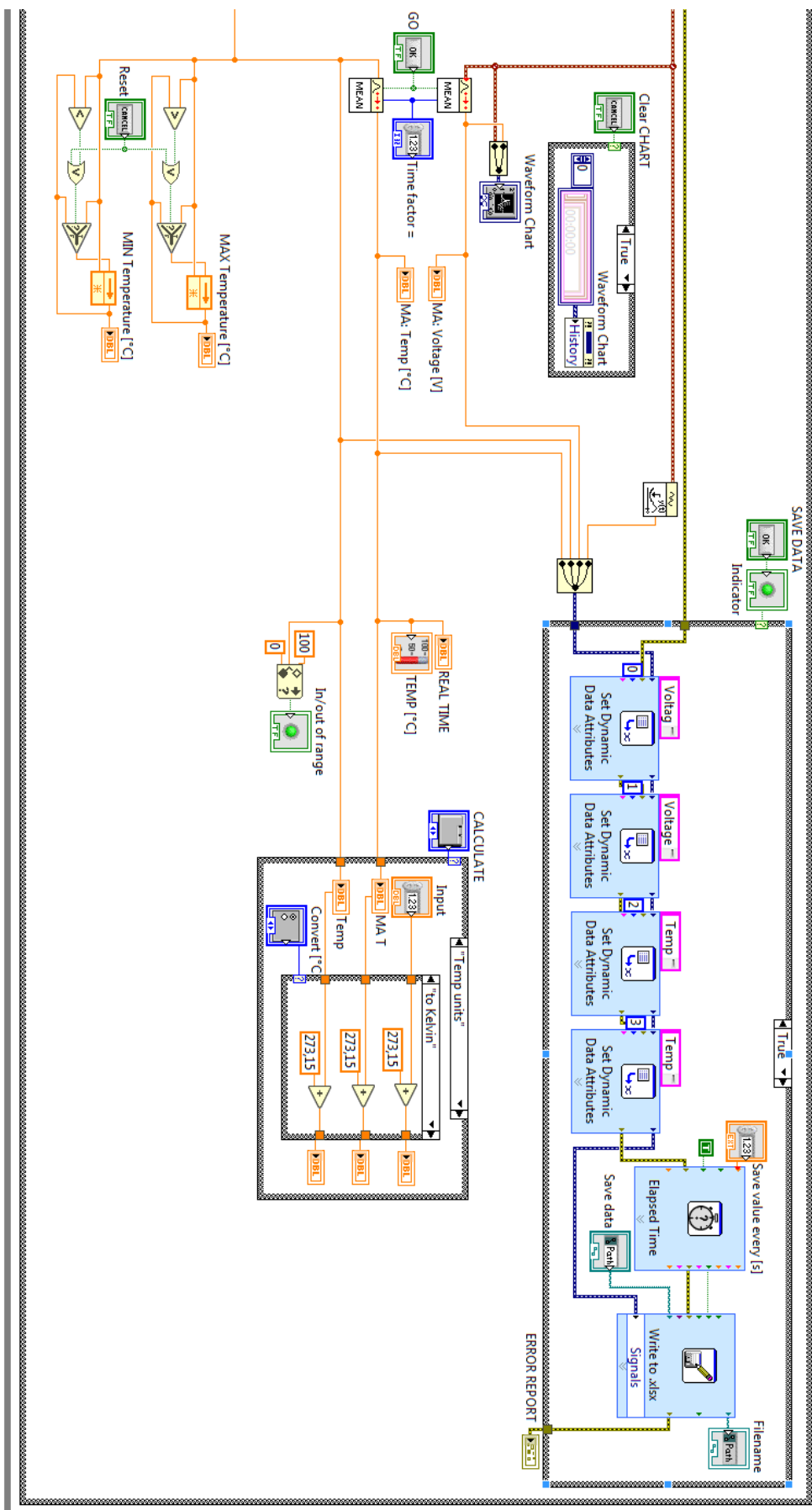


## PŘÍLOHA B (1/3)



# PŘÍLOHA B (2/3)





## PŘÍLOHA C (1/2)

### Protokol o ověření měřicího zařízení

**Pracoviště:** Český metrologický institut, Okružní 31, 638 00 Brno  
Oddělení teploty a vlhkosti



**Zadavatel:** Vysoké učení technické v Brně, FSI, Technická 2, Brno  
Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky



**Měřidlo:** měřicí řetězec: platinový odporový snímač teploty PT100 (rozsah -50 až 200 °C);  
měřicí zesilovač s napěťovým výstupem 0-10 V (0-200 °C);  
analogově digitální převodník s rozlišením 12 bitů (rozlišitelnost cca 0,1 °C)

**Výrobce, typ:** snímač: EMKO, RTS-M06-L050-K02, třída přesnosti B  
zesilovač: Enda; MU-PT100-U010-0/200  
převodník: National Instruments; NI USB-6008

**Metoda:** komparační  
**Postup:** KP 3.1.3/07/18, Česká metrologická společnost  
**Použitý etalon:** odporový snímač teploty PT100  
**Podmínky prostředí:** teplota okolí ( $23,3 \pm 0,3$ ) °C  
relativní vlhkost vzduchu ( $36 \pm 0,5$ ) %.

#### Výsledky ověření:

Vizuální a funkční kontrola: bez nálezu vad.

Kontrola izolačního odporu: hodnoty v normě.

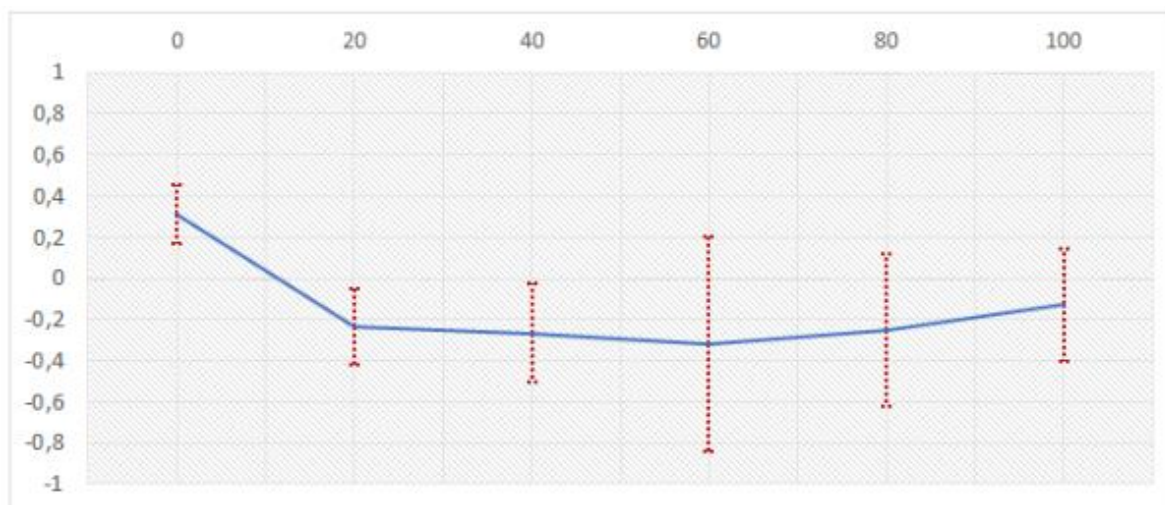
Referenční teplota (dle etalonu)	Naměřená teplota (aritmetický průměr)	Rozšířená nejistota měření	Odchylka naměřené teploty od $t_{ref}$	Tolerance pro snímače třídy přesnosti B dle ČSN EN 60751
0 °C	0,3 °C	$\pm 0,1$ °C	0,3 °C	$\pm 0,3$ °C
20 °C	19,8 °C	$\pm 0,2$ °C	-0,2 °C	$\pm 0,4$ °C
40 °C	39,7 °C	$\pm 0,2$ °C	-0,3 °C	$\pm 0,5$ °C
60 °C	59,7 °C	$\pm 0,5$ °C	-0,3 °C	$\pm 0,6$ °C
80 °C	79,7 °C	$\pm 0,4$ °C	-0,3 °C	$\pm 0,7$ °C
100 °C	99,9 °C	$\pm 0,3$ °C	-0,1 °C	$\pm 0,8$ °C

**Nejistota měření:** Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem KP 3.1.3/07/18. Uvedené rozšířené nejistoty měření jsou součinem standardní nejistoty měření a koeficientu k, který odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 %. Pro normální (Gaussovo) rozdělení je koeficient rozšíření  $k = 2$ .

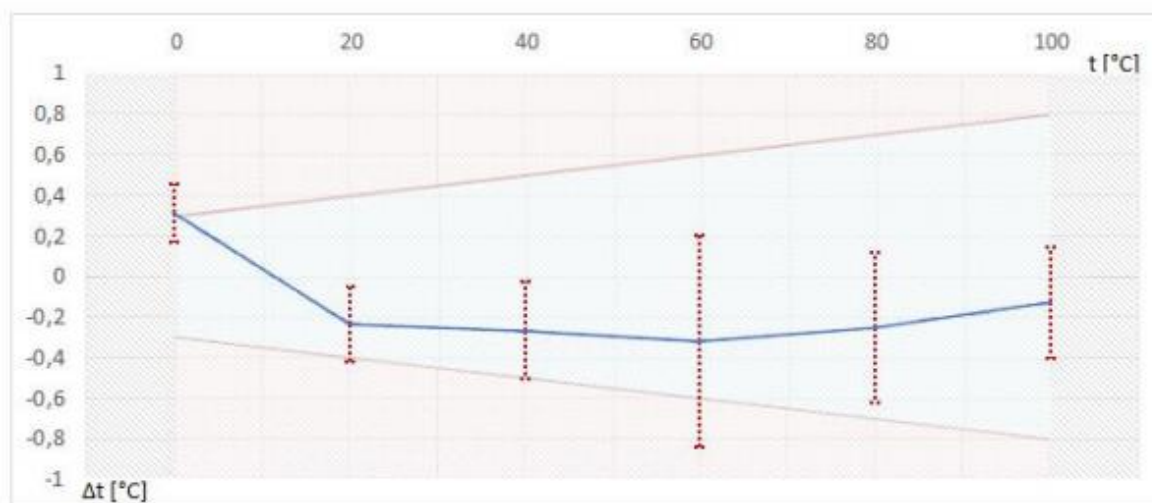
List 1/2



## PŘÍLOHA C (2/2)



**Srovnání výsledků s tolerancí snímače:**



**Legenda:**

*Svislá osa:*

*odchylka naměřené teploty od reference [°C]*

*Vodorovná osa:*

*referenční teplota [°C]*

**Vyhodnocení výsledků:** Daný měřicí řetězec nevyhovuje toleranci snímače s danou třídou přesnosti.

**Poznámka:** Ověření bylo provedeno pro nekomerční účely v rámci diplomové práce.

**Datum ověření:** 16. 5. 2019

**Měření provedl(a):** Bc. David Stejskal

**Podpis:**